



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Gebrauchsmusteranmeldung

Aktenzeichen: 299 15 847.0

Anmeldetag: 9. September 1999

Anmelder/Inhaber: Carl Zeiss, Heidenheim an der Brenz/DE

Bezeichnung: Steuerung der Beleuchtungsverteilung in der Austrittspupille eines EUV-Beleuchtungssystems

Priorität: 30.7.1999 DE 199 35 568.1

IPC: G 03 F, G 02 B

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Gebrauchsmusteranmeldung.

München, den 16. April 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident

Im Auftrag

Agurks



Steuerung der Beleuchtungsverteilung in der Austrittspupille eines EUV-Beleuchtungssystems

Die Erfindung betrifft ein Beleuchtungssystem, insbesondere ein solches für
5 die Lithographie also beispielsweise VUV und EUV-Lithographie mit
Wellenlängen kleiner gleich 193 nm, wobei das Beleuchtungssystem
wenigstens eine Lichtquelle, einen Spiegel oder Linse umfassend
Rasterelemente zur Erzeugung sekundärer Lichtquellen sowie optische
Komponenten zur Abbildung der sekundären Lichtquellen in die
10 Austrittspupille des Beleuchtungssystems umfaßt.

Um die Strukturbreiten für elektronische Bauteile noch weiter reduzieren zu
können, insbesondere in den Submikron-Bereich, ist es erforderlich, die
Wellenlänge des für die Mikrolithographie eingesetzten Lichtes zu verringern.

15 Denkbar ist bei Wellenlängen kleiner als 193 nm beispielsweise die
Lithographie mit weichen Röntgenstrahlen wie sie aus der US 5339346
bekannt geworden ist.

20 Neben der Beleuchtung gemäß der US 5339346, die mindestens vier
paarweise symmetrisch zur Quelle angeordnete Spiegelfacetten benötigt,
kann man Beleuchtungssysteme vorsehen, die beispielsweise mit Hilfe von
reflektiven Wabenplatten zur homogenen Beleuchtung des Ringfeldes eines
Belichtungsobjektives arbeiten. Solche Systeme haben den Vorteil, daß das
25 Feld eines Objektives mit möglichst wenigen Reflektionen homogen
beleuchtet wird, des weiteren eine feldunabhängige Ausleuchtung der Pupille
bis zu einem bestimmten Füllgrad gewährleistet ist.

30 Reflektive Wabenplatten für EUV-Beleuchtungssysteme sind aus der
US 5581605 bekannt geworden.

Der Offenbarungsgehalt sämtlicher vorgenannter Schriften US 5 339 346 sowie US 5 581 605 wird in vorliegender Anmeldung vollumfänglich mit aufgenommen.

5 Eine Steigerung von Auflösung und Tiefenschärfe bei VUV und EUV-
Beleuchtungssystemen ist möglich, wenn je nach Maskenstruktur, d.h. je nach
zu beleuchtendem Retikel, die Ausleuchtung der Maske eingestellt werden
kann. Im Stand der Technik erfolgte die Steuerung des Beleuchtungssettings
in der Regel mit einer Blende, die dem Spiegel bzw. der Linse mit
10 Rasterelementen nachgeordnet ist. Diesbezüglich wird beispielsweise auf die

US-A 5 526 093

JP-A-100 92 727

JP-A-102 75 771

15 JP-A-100 62 710

JP-A-090 63 943

verwiesen.

20 Aus der JP-A-103 031 23 ist ein Beleuchtungssystem mit einer Hg-Lampe für
Wellenlängen > 248 nm bekanntgeworden, bei dem vor einem optischen
Integrator eine Scanblende angeordnet ist, die eine vorbestimmte Lichtmenge
in den optischen Integrator einsteuert, so daß sich in einer Blendenebene eine
bestimmte Lichtverteilung ergibt.

25

Die US-A-5 379 090 zeigt ebenfalls ein Beleuchtungssystem für Wellenlängen
 < 248 nm mit einer Hg-Lampe. Das System gemäß der US-A-5 379 090
umfaßt ein Vario- bzw. Zoomobjektiv mit dem die Größe der sekundären
Lichtquelle eingestellt wird. Zusätzlich wird eine Blende zum Formen der
30 Lichtverteilung auf der zu beleuchtenden Maske eingesetzt.

Aus der US 5 896 438 ist ein EUV-Beleuchtungssystem mit Undulator-Lichtquelle bekannt geworden, bei dem mittels eines Scan-Spiegels ein optischer Integrator mit Rasterelementen ausgeleuchtet werden kann. Aufgabe des Scan-Spiegels bei dieser Beleuchtungs-Einrichtung ist eine

5 Kohärenzerhöhung durch einen Winkel-Scan des EUV-Lichtstrahles. Inwieweit durch das Einbringen eines Scan-Spiegels die Qualität der Maskenbeleuchtung, das heißt der Beleuchtung des Retikels beeinflußt wird, ist aus der US 5 896 438 nicht bekannt geworden.

10 Der Offenbarungsgehalt der US 5 896 438 wird in den Offenbarungsgehalt der vorliegenden Anmeldung vollumfänglich mit aufgenommen.

Nachteilig an dem EUV-System aus dem Stand der Technik war, daß die Steuerung der Lichtverteilung in der Blendenebene mit Masken mit einem

15 beträchtlichen Lichtverlust verbunden war oder eine vorgebbare Uniformität in der Objekt- bzw. Retikelebene nicht erreicht wurde, wenn die Durchmischung oder die Zahl der ausgeleuchteten Waben zu gering war.

Aufgabe der Erfindung ist es somit, ein EUV-Beleuchtungssystem anzugeben, mit dem die zuvor angegebenen Nachteile im Stand der Technik vermieden werden können. Insbesondere soll für beliebige VUV- und EUV-Quellen ein

20 System angegeben werden, bei dem die Steuerung der Lichtverteilung in der Austrittspupille des Beleuchtungssystems bei gleichzeitig homogener Ausleuchtung der Objekt- bzw. Retikelebene möglich ist.

25 Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch ein EUV-Beleuchtungssystem mit den Merkmalen des Anspruches 1 gelöst.

Die Erfinder haben erkannt, daß durch den Einsatz eines Scan-Spiegels bei

30 variabler Ausleuchtung eines Spiegels oder einer Linse mit Rasterelementen die Uniformität in der Retikelebene beim Scan verringert werden kann.

Erfindungsgemäß ist daher vorgesehen, die Anzahl der beleuchteten Rasterelemente an die gewünschte Uniformität der Felddausleuchtung anzupassen.

5 Als Lichtquellen für EUV-Beleuchtungssysteme werden derzeit diskutiert:

Laser-Plasma-Quellen

Pinch-Plasma-Quellen

Synchrotron-Strahlungsquellen

10

Bei Laser-Plasma-Quellen wird ein intensiver Laserstrahl auf ein Target (Festkörper, Gasjet, Tröpfchen) fokussiert. Durch die Anregung wird das Target so stark erhitzt, daß ein Plasma entsteht. Dieses emittiert EUV-Strahlung.

15

Typische Laser-Plasma-Quellen weisen eine kugelförmige Abstrahlung auf, d.h. einen Abstrahlwinkelbereich von 4π sowie einen Durchmesser von $50\ \mu\text{m}$ - $200\ \mu\text{m}$.

20

Bei Pinch-Plasma-Quellen wird das Plasma über elektrische Anregung erzeugt.

Pinch-Plasma-Quellen lassen sich als Volumenstrahler ($\phi = 1.00\ \text{mm}$) beschreiben, die in 4π abstrahlen, wobei die Abstrahlcharakteristik durch die Quellgeometrie gegeben ist.

25

Bei Synchrotronstrahlungsquellen kann man derzeit drei Arten von Quellen unterscheiden:

30

- Bending-Magneten
- Wiggler

- Undulatoren

Bei Bending-Magnet-Quellen werden die Elektronen durch einen Bending-Magneten abgelenkt und Photonen-Strahlung emittiert.

5

Wiggler-Quellen umfassen zur Ablenkung des Elektrons bzw. eines Elektronenstrahles einen sogenannten Wiggler, der eine Vielzahl von aneinandergereihten abwechselnd gepolten Magnetpaaren umfaßt. Durchläuft ein Elektron einen Wiggler, so wird das Elektron einem periodischen, vertikalen Magnetfeld ausgesetzt; das Elektron oszilliert dementsprechend in der horizontalen Ebene. Wiggler zeichnen sich weiter dadurch aus, daß keine Kohärenzeffekte auftreten. Die mittels eines Wigglers erzeugte Synchrotronstrahlung ähnelt der eines Bending-Magneten und strahlt in einen horizontalen Raumwinkel ab. Sie weist im Gegensatz zum Bending-Magneten einen um die Anzahl der Pole des Wigglers verstärkten Fluß auf.

10

15

Der Übergang von Wiggler-Quellen zu Undulator-Quellen ist fließend.

Bei Undulator-Quellen werden die Elektronen im Undulator einem Magnetfeld mit kürzerer Periode und geringerem Magnetfeld der Ablenkpole als beim Wiggler ausgesetzt, so daß Interferenz-Effekte der Synchrotronstrahlung auftreten. Die Synchrotronstrahlung weist aufgrund der Interferenzeffekte ein diskontinuierliches Spektrum auf und strahlt sowohl horizontal wie vertikal in ein kleines Raumwinkelement ab; d.h. die Strahlung ist stark gerichtet.

20

25

Betreffend den prinzipiellen Aufbau von EUV-Beleuchtungssystemen wird auf die anhängigen Anmeldungen EP 99106348.8, eingereicht am 2.03.1999, mit dem Titel "Beleuchtungssystem, insbesondere für die EUV-Lithographie", US-Serial No. 09/305,017, eingereicht am 04.05.1999 mit dem Titel "Illumination system particularly for EUV-Lithography" sowie PCT/EP99/02999, eingereicht am 04.05.1999, mit dem Titel "Beleuchtungssystem, insbesondere für die

30

EUV-Lithographie" der Anmelderin verwiesen, deren Offenbarungsgehalt vollumfänglich in die vorliegende Anmeldung mitaufgenommen wird.

5 In einer ersten Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß die Mittel zur Erzeugung der Lichtverteilung einen Scan-Spiegel wie beispielsweise in der US 5 896 438 umfassen. Bevorzugt ist ein derartiger Scan-Spiegel ansteuerbar. Die Verwendung eines Scan-Spiegels hat den Vorteil einer verlustfreien Steuerung der Beleuchtungsverteilung. Insbesondere bietet sich die Verwendung eines Scan-Spiegels bei Lichtquellen mit kleinem
10 Lichtleitwert, beispielsweise Undulator-Lichtquellen an, wobei bei derartigen Systemen Scan-Spiegel zur Erhöhung des Lichtleitwertes eingesetzt werden.

Durch eine entsprechende Steuerung der Scan-Bewegung kann der Spiegel mit den Rasterelementen zur Erzeugung sekundärer Lichtquellen
15 entsprechend ausgeleuchtet werden. In einer alternativen Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, daß vor dem Spiegel mit Rasterelementen ein optisches System mit Zoom-Wirkung angeordnet ist. Mit einem derartigen optischen System können variable Brennweiten durch Verschieben einzelner optischer Komponenten bei konstanter Bildebene, die hier die Ebene des
20 Spiegels mit Rasterelementen ist, beleuchtet werden.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß zur Erzeugung einer Lichtverteilung vorbestimmter Größe die gesamte Kollektoreinheit bestehend beispielsweise aus Zerstreuspiegel und
25 Sammellinse ausgetauscht wird.

Hierdurch ergibt sich beispielsweise die Möglichkeit, einen größeren oder kleineren Kreis auf der Feldwabenplatte auszuleuchten.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, daß das Beleuchtungssystem einen Spiegel oder eine Linse mit deformierbarer Oberfläche umfaßt.

5 Spiegel mit deformierbarer Oberfläche sind beispielsweise aus der JP-A-5100097 oder der US-A-5825844 bekanntgeworden, wobei der Offenbarungsgehalt vorgenannter Schrift in die vorliegende Anmeldung vollumfänglich mitaufgenommen wird.

10 Bei der JP-A-5100097 wird die Oberflächendeformation mit Hilfe von Piezo-Kristallen angeregt. Dabei werden an der Unterseite des Spiegels eine Vielzahl von Manipulatoren angebracht. Aus der US-A-5825844 ist neben einer Anregung mit Piezo-Kristallen auch eine elektromagnetische Anregung bekanntgeworden.

15 Der deformierbare Spiegel zum Erzeugen einer vorbestimmten Lichtverteilung in der Austrittspupille kann in der Kollektoreinheit angeordnet sein; bei Beleuchtungssystemen mit Zwischenbild bzw. einer in der zur Retikelebene konjugierten Ebene kann der deformierbare Spiegel auch in dieser Ebene angeordnet sein.

20 Für die Lichtverteilung in der Austrittspupille ergeben sich eine Vielzahl von Möglichkeiten. In einer ersten Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, daß die Austrittspupille kreisförmig ausgeleuchtet wird. Alternativ zu einer kreisrunden Ausleuchtung kann eine ringförmige Ausleuchtung oder eine Quadropol-Beleuchtung vorgesehen sein.

25 Um bei Systemen, bei denen das Feld ein hohes Aspektverhältnis aufweist, die Uniformität der Feldausleuchtung sicherzustellen, ist mit Vorteil vorgesehen, daß die Rasterelemente des Spiegels oder Linse zur Erzeugung sekundärer Lichtquellen Feldwaben mit einem geringeren Aspektverhältnis als

30

das Feld umfassen und beispielsweise zylinder- und/oder toroidförmig ausgebildet sind. Dadurch wird die Zahl der unvollständig ausgeleuchteten Feldwaben verringert. Bezüglich der Wirkung derartiger Systeme wird auf die anhängige Anmeldung

5 DE 199 31 848.4, eingereicht am 09.07.1999, mit dem Titel "Komponenten mit anamorphotischer Wirkung zur Reduzierung des Waben-Aspektverhältnisses bei EUV-Beleuchtungssystemen" verwiesen, deren Offenbarungsgehalt vollumfänglich in die vorliegende Anmeldung mit aufgenommen wird.

10 Neben dem Beleuchtungssystem stellt die Erfindung auch eine EUV-Projektionsanlage mit einem derartigen Beleuchtungssystem zur Verfügung sowie ein Verfahren zur Herstellung mikroelektronischer Bauelemente.

15 Nachfolgend soll die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen näher beschrieben werden.

Es zeigen:

Fig. 1A

20 und 1B: prinzipieller Aufbau eines Beleuchtungssystems mit einer Undulator-Einheit als Lichtquelle;

Fig. 2A: Ausgestaltung eines Aufbaues gemäß Figur 1A beziehungsweise 1B;

25 Fig. 2B: Ausgestaltung eines Aufbaus gemäß Fig. 1A beziehungsweise 1B mit einem Scan-Spiegel;

Fig.2C-2D: Ausgestaltung eines Aufbaues gemäß Figur 1A beziehungsweise 1B mit einem deformierbaren Spiegel in der Kollektoreinheit für zwei Zustände des deformierbaren Spiegels.

Fig. 2E: Beleuchtungssystem mit Zwischenbild, wobei der deformierbare Spiegel in der zur Retikelebene konjugierten Ebene angeordnet ist.

Fig. 2F: Ausschnitt des zusätzlichen Spiegels mit einer Anzahl von auf der Spiegeloberfläche angeordneten Feldwaben.

Fig. 2G: Seitenansicht des zusätzlichen Spiegels mit Feldwaben.

Fig. 3: Beispiel für einen Spiegel mit darauf angeordneten Rasterelementen;

Fig. 4A: Verteilung der sekundären Lichtquelle in der Blendenebene bei einem Spiegel gemäß Figur 3;

Fig. 4B-4M: eine zweite Ausführungsform einer EUV-Beleuchtungssystems mit Wiggler-Quelle;

Fig. 5: Zusammenhang zwischen Objektivapertur und Ausleuchtung zur Definition des Füllfaktors;

Fig. 6A: Ausleuchtung der Feldwabenplatte mit einem Füllfaktor $\sigma = 1,0$;

Fig. 6B: Ausleuchtung der Feldwabenplatte mit einem Füllfaktor $\sigma = 0,6$;

Fig. 6C: annulare Ausleuchtung der Feldwabenplatte mit einem Füllfaktor

$$\frac{\sigma_{out}}{\sigma_{in}} = \frac{1,0}{0,7}$$

Fig. 6D: Beleuchtung der Feldwabenplatte bei Quadrupol-Beleuchtung;

Fig. 7: Pupillenausleuchtung bei $\sigma = 1,0$ für den Feldpunkt auf der optischen Achse;

Fig. 8: Pupillenausleuchtung bei $\sigma = 1,0$ für einen Feldpunkt am Feldrand ($x = 40, y = 4,04$);

Fig. 9: Pupillenausleuchtung bei $\sigma = 0,6$ für den Feldpunkt auf der optischen Achse;

Fig. 10: Pupillenausleuchtung bei $\sigma = 0,6$ für einen Feldpunkt am Feldrand ($x = 40, Y = 4,04$);

Fig. 11: Pupillenausleuchtung bei annularer Ausleuchtung für einen Feldpunkt auf der optischen Achse;

Fig. 12: Pupillenausleuchtung bei annularer Ausleuchtung für einen Feldpunkt am Feldrand ($x = 40, y = 4,04$);

Fig. 13: Pupillenausleuchtung bei quadrupolarer Ausleuchtung für einen Feldpunkt auf der optischen Ebene;

Fig. 14: Pupillenausleuchtung bei quadrupolarer Ausleuchtung für einen Feldpunkt am Feldrand ($x = 40, y = 4,04$);

Fig. 15: integrale Scan-Energie in der Retikelebene bei einer Beleuchtungsverteilung mit $\sigma = 1,0$ in der Austrittspupille;

Fig. 16: integrale Scan-Energie in der Retikelebene bei einer Beleuchtungsverteilung mit $\sigma = 0,6$ in der Austrittspupille;

Fig. 17: integrale Scan-Energie in der Retikelebene für eine annulare Beleuchtungsverteilung;

Fig. 18: integrale Scan-Energie in der Retikelebene bei quadropolarer Beleuchtungsverteilung.

In den Figuren 1A und 1B wird beispielhaft der prinzipielle Aufbau eines EUV-Beleuchtungssystems mit einer Synchrotron-Strahlungslichtquelle, die vorliegend als Undulator ausgebildet ist, gezeigt, ohne daß die Erfindung hierauf beschränkt ist.

Undulator-Quellen weisen in der ausgezeichneten Ebene in die das vorbestimmte Wellenlängenspektrum abgestrahlt wird, eine Strahldivergenz < 100 mrad, vorzugsweise < 50 mrad auf. Handelt es sich bei der Lichtquelle um eine ausgedehnte Quelle, so kann es erforderlich werden, am Ort der sekundären Lichtquellen einen zweiten Spiegel oder eine zweite Linse mit Rasterelementen vorzusehen, um die Rasterelemente des ersten Spiegels oder Linse korrekt in die Retikelebene abzubilden.

In den Figuren 1A und 1B ist ein EUV-Beleuchtungssystem in einer refraktiven Darstellung zur prinzipiellen Erläuterung des Systems gezeigt. Die Strahlaufweitung des von der Strahlungsquelle 1 emittierten Strahles geschieht vorliegend mit Hilfe einer Zerstreulinse 3 bzw. Zerstreuspiegel ohne hierauf beschränkt zu sein.

Betreffend den Aufbau von Beleuchtungssystemen wird auf die anhängigen Anmeldungen EP 99106348.8, einreicht am 02.03.1999, mit dem Titel "Beleuchtungssystem, insbesondere für die EUV-Lithographie", US-Serial No. 09/305,017, eingereicht am 04.05.1999, mit dem Titel "Illumination system particular for EUV-Lithography" sowie PCT/EP99/02999, eingereicht am 04.05.1999, mit dem Titel "Beleuchtungssystem, insbesondere für die EUV-Lithographie" der Anmelderin verwiesen, deren Offenbarungsgehalt vollumfänglich in die vorliegende Anmeldung mitaufgenommen wird.

Die sammelnde Wirkung zur Erzeugung der sekundären Lichtquelle 12 wird durch den der Zerstreulinse bzw. dem Zerstreuspiegel 3 nachgeordneten Sammelspiegel bzw. Sammellinse 5 aufgebracht. Die Mittel zur Strahlaufweitung und der Spiegel bzw. die Linse mit sammelnder Wirkung bilden eine sogenannte Kollektoreinheit bzw. ein Kollektorsystem 7 aus. Ohne Spiegel mit Rasterelementen würde der Sammelspiegel 5 die Quelle 1 in die Bildebene 9 des Beleuchtungssystems, wie in Fig. 1A gezeigt, abbilden. Mit dem Spiegel mit Rasterelementen 10 bzw. dem Facettenspiegel wird die sekundäre Lichtquelle 12 in eine Vielzahl von sekundären Lichtquellen 14 zerlegt, so daß eine Vielzahl von sekundären Lichtquellen 14 in der Blendenebene 16 erzeugt werden, wie in Figur 1B dargestellt. Die Rasterelemente 10 des ersten Spiegels werden nachfolgend auch als Feldwaben bezeichnet.

Werden die in den Figuren 1A und 1B als refraktive Systeme aufgezogenen Beleuchtungssysteme beispielsweise für EUV-Strahlung designt, so müssen diese für die 13 nm-Strahlung reflektiv und aufgrund der hohen Reflektionsverluste mit möglichst wenigen Reflektionen umgesetzt werden.

Für eine Undulator-Quelle kann die Kollektoreinheit bei 13 nm-Strahlung aus einem ersten grazing incidence Spiegel oder einem Scanspiegel, der die Strahlung aufweitet, und einem zweiten normal incidence Spiegel, der wieder sammelnd auf die Strahlung wirkt, bestehen. Der Vorteil des Scan-Spiegels liegt darin, daß hiermit die Größe der Ausleuchtung variiert werden kann.

Um zu einem vorteilhaften Design bei 13 nm Wellenlänge zu gelangen, sind aufgrund der höheren Reflektivität grazing incidence Spiegel ($R \approx 80\%$) normal incidence Spiegeln ($R \approx 65\%$) vorzuziehen.

Vorteilhafterweise strahlt die Quelle in horizontaler Richtung ab.

Die den Spiegeln mit Rasterelementen nachgeordneten optischen Elemente dienen dazu, die Blendenebene des Beleuchtungssystems in die Eintrittspupille des Projektionsobjektives abzubilden und das Ringfeld zu formen. Des weiteren dienen sie dazu, die Beleuchtungsverteilung
5 entsprechend den Anforderungen zu erzeugen.

Bei Stepper-Systemen wird eine Uniformität der Intensitätsverteilung innerhalb eines vorgegebenen Feldes $< 10 \%$, vorzugsweise $< 5 \%$, besonders bevorzugt $< 1 \%$, gefordert.

10 Für die Uniformität der Intensitäts-Verteilung $E(x,y)$ gilt

$$\text{Uniformität} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%$$

15 wobei E_{\max} die maximale und E_{\min} die minimale Intensität innerhalb des vorgegebenen Feldes sind.

Bei Scanner-Systemen wird eine Uniformität der Scan-Energie $< 10 \%$, bevorzugt $< 5 \%$, besonders bevorzugt $< 1 \%$, gefordert.

20 Die Scan-Energie $SE(x)$ ergibt sich als Linienintegral:

$$SE(x) = \int E(x,y) dy$$

25 wobei $E(x,y)$ die Intensitätsverteilung in der x-y-Ebene ist,

entlang der Scan-Richtung, die beispielsweise die y-Richtung ist. Jeder Punkt auf dem Wafer enthält entsprechend seiner x-Koordinate die Scan-Energie $SE(x)$.

Für die Uniformität der Scan-Energie gilt:

$$\text{Uniformität} = \frac{SE_{\max} - SE_{\min}}{SE_{\max} + SE_{\min}} \times 100\%$$

wobei SE_{\max} die maximale und SE_{\min} die minimale Scan-Energie entlang des Scan-Weges bezeichnet.

In Figur 2A ist in schematischer Darstellung ein Beleuchtungssystem für 13 nm-Strahlung mit einer Synchrotron-Strahlungsquelle, in diesem Fall einem Undulator, gezeigt.

Das System besteht aus einem Kollektorspiegel 30, der als grazing incidence Toroidspiegel, der das Strahlbüschel aufweitet, ausgebildet ist und einem normal incidence Kollektorspiegel 32, der den Spiegel mit Rasterelementen 34 ausleuchtet.

Die Feldspiegel 36, 38 sind als grazing incidence Feldspiegel ausgebildet. Sie formen das Feld in der Retikelebene 39 und bilden die Blendenebene in die Austrittspupille ab.

In Fig. 2B ist dieselbe Anordnung wie in Fig 2A gezeigt, jedoch ist der Spiegel 30, als Scan-Spiegel zur variablen Ausleuchtung des Spiegels mit Rasterelementen bzw. Feldwaben 34 ausgebildet.

In Figur 2C und 2D ist eine schematische Darstellung eines Beleuchtungssystem gemäß Figur 1A beziehungsweise 1B ohne Zwischenbild gezeigt, bei dem der Kollektorspiegel 30, der den von der Synchrotron-Strahlungsquelle beispielsweise einer Undulator-Quelle kommenden Strahl aufweitet, ein Spiegel mit deformierbarer Oberfläche ist.

Dadurch läßt sich die Ausleuchtung auf dem Kollektorspiegel 32 und damit auch auf dem Spiegel 34 mit Feldwaben steuern. Beispielhaft soll nachfolgend die Variation der Beleuchtungsverteilung für ein Beleuchtungssystem mit Undulator-Quelle aufgezeigt werden. Die Undulator-Quelle strahlt mit einer horizontalen Divergenz von $\pm 1 \text{ mrad}$ und einer vertikalen Divergenz von $\pm 0.3 \text{ mrad}$ ab. Im Abstand von 5000 mm befindet sich der Kollektorspiegel 30. Der Kippwinkel des Kollektorspiegels 30 beträgt 80° . Nach 3000 mm folgt der Kollektorspiegel 32, dessen Kippwinkel 5° beträgt. Die Feldwabenplatte d. h. der Spiegel mit Feldwaben 34 befindet sich im Abstand von 650 mm vom Kollektorspiegel 32. Um die Eintrittspupille des nachfolgenden Objektivs voll zu füllen, das heißt $\sigma = 1.0$ muß die Feldwabenplatte 34 bis zu einem Durchmesser von 64 mm ausgeleuchtet sein. Dies entspricht dem Zustand in Figur 2 C.

Um eine vollständige Füllung von $\sigma = 1.0$ zu erreichen sind bei den zuvor beschriebenen Beleuchtungssystem torische Kollektorspiegel 30, 32 mit nachfolgenden Radien erforderlich:

	R_x [mm]	R_y [mm]
Kollektorspiegel 30	-156.6 (zerstreuend)	-1373.5 (zerstreuend)
Kollektorspiegel 32	3138.0 (sammelnd)	2967.9 (sammelnd)

Um zum Beispiel einen Füllgrad von $\sigma = 0.3$ zu erzielen, muß der ausgeleuchtete Durchmesser auf 19,2 mm reduziert werden. Dies entspricht dem Zustand in Figur 2 C. Dazu müssen die Radien des Kollektorspiegels 30 durch geeignete Manipulatoren folgendermaßen geändert werden:

	R_x [mm]	R_y [mm]
Kollektorspiegel 30	-985.0 (zerstreuend)	-5241.0 (zerstreuend)
Kollektorspiegel 32	3138.0 (sammelnd)	2967.9 (sammelnd)

Während die Radien des Kollektorspiegels 30 verändert werden, bleiben die Radien des Kollektorspiegels 32, unverändert.

5 Möglich ist beispielsweise, den Kollektorspiegel 30 auszutauschen. Mit Wechseloptiken läßt sich so jeder Füllgrad zwischen $\sigma = 0,3$ und $\sigma = 1,0$ einstellen.

10 Ist der Kollektorspiegel 30 als Spiegel mit deformierbarer Oberfläche ausgestaltet, so kann durch Deformation der Oberfläche innerhalb der oben angegebenen Radien jeder beliebige Füllgrad zwischen $\sigma = 0,3$ und $\sigma = 1,0$ eingestellt werden. Dabei sind die Oberflächen nicht auf rein torische Flächen beschränkt. Durch Einbringen von konischen oder höheren asphärischen Flächenanteilen ist es zudem möglich, die Abbildungseigenschaften zu verändern.

15

Die Deformation ist zum Beispiel durch eine Vielzahl von Manipulatoren an der Unterseite des Spiegels möglich. Die Manipulatoren können Piezoelemente und/oder Elemente für eine elektromagnetische Anregung umfassen.

20

An Stelle des Kollektorspiegels 30 kann auch ein zusätzlicher Spiegel mit Rasterelementen, neben dem Spiegel mit Feldwaben 34 treten. Der zusätzliche Spiegel mit Rasterelementen umfaßt Einzelwaben, wobei die Einzelwaben als sammelnde oder zerstreuernde Spiegel oder reflektive diffraktive Elemente ausgestaltet sind. Dadurch läßt sich eine sehr homogene Ausleuchtung des Kollektorspiegels 32 und damit auch der Feldwabenplatte 34 erzielen. Zur variablen Ausleuchtung der Feldwabenplatte können die Spiegel mit Rasterelementen als Austausch Elemente vorgesehen werden.

25

30

In Figur 2E ist ein Beleuchtungssystem mit Zwischenbild Z dargestellt. Das Zwischenbild Z befindet sich dabei in einer zur Retikelebene konjugierten

Ebene. Gleiche Bauteile wie in den Figuren 2C und 2D sind mit denselben Bezugsziffern belegt. Bei einem derartigen System kann, um die Beleuchtungsverteilung in der Austrittspupille des Beleuchtungssystems zu variieren, in diesem Zwischenbild ein weiterer zusätzlicher Spiegel 200 plaziert werden.

Da sich die Retikelebene bei diesem System konjugiert zu dem zusätzlichen Spiegel 200 befindet, wird die Winkelverteilung in der Retikelebene beeinflusst, während die Feldverteilung nahezu unbeeinflusst bleibt.

Bei Systemen mit Zwischenbild Z wird nach dem Spiegel 34 mit Feldwaben beziehungsweise nach dem Spiegel mit Pupillenwaben am Ort des vorläufigen Zwischenbildes Z der zusätzliche Spiegel 200 eingebaut. Der Ort dieses Spiegels 200 befindet sich in der Ebene, in der sich die Bilder der Feldwaben überlagern. Nach diesem zusätzlichen Spiegel 200 folgen ein oder zwei weitere zusätzliche Spiegel 202, die das Zwischenbild in die Retikelebene abbilden. Im dargestellten Beispiel ist dafür ein normal incidence Spiegel 202, vorgesehen.

Die auf den weiteren zusätzlichen Spiegel 202 folgenden Feldspiegel 36, 38 haben die Aufgabe der Ringfeldformung, der Abbildung der Austrittspupille des Beleuchtungssystems in die Eintrittspupille des nachfolgenden Objektives sowie die Steuerung der Beleuchtungsverteilung.

Der zusätzliche Spiegel 200 kann beispielsweise als zusätzlicher Spiegel mit Rasterelementen neben dem Spiegel mit Feldwaben 34 ausgeführt sein. Dabei sind die Rasterelemente des zusätzlichen Spiegels, sogenannte Einzelwaben, als sammelnde oder zerstreue Spiegel oder entsprechende diffraktive Elemente ausgestaltet. Die Einzelwaben 201 können beispielsweise als Sechsecke in einer dichten Packung angeordnet sein. Eine derartige Anordnung ist in Figur 2 F gezeigt. Ein einfallendes Lichtbündel wird durch

die Vielzahl von Einzelwaben so umgewandelt, daß von jeder Einzelwabe 201 ein Lichtbüschel 203 vorgegebener Apertur ausgeht wie in Figur 2 G gezeigt. Die Ausdehnung der Einzelwaben muß so klein wie möglich gewählt werden, um die Uniformitätsanforderungen in der Retikelebene erfüllen zu können. Eine typische Ausdehnung der Waben liegt bei $10\ \mu\text{m}$. Um in der Intensitätsverteilung der Retikelebene die Diskretisierung der Einzelwaben nicht zu sehen, ist es beispielsweise möglich, den zusätzlichen Spiegel mit Rasterelementen defokussiert zum Zwischenbild anzuordnen. Je nach Wirkung der Einzelwaben läßt sich die Ausleuchtung der Austrittspupille des Beleuchtungssystems variieren. Durch Tausch der Elemente kann der Füllgrad zwischen zum Beispiel $\sigma = 0,2$ und $\sigma = 1,0$ variiert werden.

Alternativ kann der zusätzliche Spiegel 200 als deformierbarer Spiegel ausgeführt sein.

Generell kann man zwei Arten der Deformation einer Spiegeloberfläche in einer zur Retikelebene konjugierten Ebene unterscheiden:

- Statische Deformationen mit großen Ortsfrequenzen, die zu einer Veränderung der Schwerstrahlwinkelverteilung in der Retikelebene führen. Dieser Effekt kann beispielsweise zur Korrektur der Telezentrie herangezogen werden.
- Dynamische Deformationen mit sehr kleinen Ortsfrequenzen, die zu einer Variation der Aperturverteilung um den im Mittel konstanten Schwerstrahl führen und damit zu der gewünschten Beeinflussung der Ausleuchtung der Austrittspupille des Beleuchtungssystems führen. Derartige dynamische Deformationen zur Steuerung der Beleuchtungsverteilung müssen im Vergleich zur Belichtungszeit beziehungsweise Scangeschwindigkeit sehr schnell sein.

Die dynamischen Deformationen mit sehr kleinen Ortsfrequenzen lassen sich beispielsweise einsetzen, um die Beleuchtungsverteilung in der Austrittspupille des Beleuchtungssystems zu homogenisieren. Wie in den Figuren 7 bis 13 zu sehen, befinden sich zwischen den Bildern der sekundären Lichtquellen in der Austrittspupille unbeleuchtete Bereiche. Durch Vibrieren der Oberfläche des zusätzlichen deformierbaren Spiegels 200 lassen sich die im statischen Fall unbeleuchteten Bereiche im zeitlichen Mittel betrachten ebenfalls ausleuchten.

Zur gleichmäßigen Verteilung der sekundären Lichtquellen in der Blendenebene wurden die Facettenzeilen 40 mit den einzelnen Rasterelementen auf dem Spiegel 34 versetzt zueinander angeordnet, wie in Figur 3 gezeigt. Der Kreis 41 in Fig. 3 zeigt die Ausleuchtung des Spiegels mit Rasterelementen durch die EUV-Quelle 1. Das Aspektverhältnis der Rasterelemente 42 beträgt in dem dargestellten Fall 17,5:1.

Die Rasterelemente 42, die auch als Feldwaben nachfolgend bezeichnet werden, erzeugen in der Blendenebene des Beleuchtungssystems sekundäre Lichtquellen, deren Verteilung durch die Verteilung der Rasterelemente auf dem Spiegel vorgegeben ist.

Die sich in der Blendenebene ergebende Verteilung sekundärer Lichtquellen 44, bei Verwendung eines Spiegels mit Rasterelementen gemäß Figur 3, ist in Figur 4 gezeigt.

Die schattierte Fläche 46 in der Blendenebene gibt die maximale Blendenausleuchtung an, die von einem dem Beleuchtungssystem nachgeordneten Objektiv, dessen Eintrittspupille in vorliegendem Fall mit der Austrittspupille des Beleuchtungssystems zusammenfällt, aufgenommen werden kann.

Typischerweise beträgt die waferseitige Apertur eines EUV-
Beleuchtungssystems $NA_{\text{Wafer}} = 0,1$. Dies entspricht bei einem
Objektivabbildungsmaßstab von $\beta = -0,25$ in der Retikelebene einer Apertur
von $NA_{\text{Retikel}} = 0,025$ bzw. bei dem vorliegend betrachteten System einem
5 Durchmesser von 70 mm auf der Feldwabenplatte.

Nachfolgend soll ein weiteres EUV-Beleuchtungssystem beispielhaft
beschrieben werden.

10 Die für das nachfolgend beschriebene Design zugrundeliegende Wiggler-
Quelle weist in horizontaler Richtung eine Apertur von 33 mrad, in vertikaler
Richtung eine Apertur von 2 mrad auf. Die Länge der Quelle beträgt 2 m.

15 Das Beleuchtungssystem für diese Wiggler-Quelle geht von einer
Doppelfacettierung, d.h. zwei Spiegeln mit Rasterelementen, aus, um zum
einen die Quellstrahlung mit dem hohen Aspektverhältnis aufzunehmen und
zum anderen die runde Pupille zu füllen.

20 Die Strahlung wird von einem grazing incidence Kollektorspiegel
aufgenommen und in ein nahezu paralleles Strahlenbündel umgewandelt.
Die darauf folgende Feld- und Pupillenwabenplatten werden als normal
incidence Spiegel betrieben. Die Feldwaben werden so verteilt, daß sie die
ausgeleuchtete rechteckige Fläche optimal abdecken. Jeder Feldwabe wird
anschließend eine Pupillenwabe zugeordnet, die auf einem radialen Gitter in
25 der Blende des Beleuchtungssystems angeordnet sind. Die Anordnung der
Pupillenwaben wird so korrigiert, daß Aberrationen der Feldlinse vorgehalten
werden. Durch Kipp von Feld- und Pupillenwaben werden die Bilder der
Feldwaben in der Retikelebene überlagert. Mit den beiden grazing incidence
Feldspiegeln wird das Beleuchtungssystem an ein nachfolgendes
30 Projektionsobjektiv angepaßt.

Feld- und Pupillenwabenplatte bestehen in diesem System aus sammelnden Waben, die einzeln gekippt und im Falle der Feldwaben auch ein hohes Aspektverhältnis aufweisen.

5 Ausgelegt ist das Beleuchtungssystem für folgendes Feld in der Retikelebene:

- 60°-Segment mit $r = 104 \text{ mm}$ und $\Delta r = \pm 4,0 \text{ mm} \rightarrow x\text{-}y\text{-}$
Aspektverhältnis von $108,9 \text{ mm}/8 \text{ mm} = 13,6/1$.
- Apertur in der Retikelebene $NA_{\text{Ret}} = 0,05$.
- Baulänge L zwischen Pupillenwabenplatte und Retikel: $L = 1000 \text{ mm}$.
- Die Anzahl der Feldwaben wurde so gewählt, daß die Anforderungen an die Uniformität der Scan-Energie erfüllt werden können.

15 Die Kollektoreinheit ist so ausgelegt, daß sie die Feldwabenplatte der Größe $A = 160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ausleuchtet. Die Ausleuchtung ist dabei durch die Wirkung des grazing incidence Kollektorspiegels ringförmig, so daß nicht alle Feldwaben beleuchtet werden.

20 Die Form der Feldwaben wird rechteckig gewählt. Dabei entspricht das Aspektverhältnis der Feldwaben dem Verhältnis von Bogenlänge zu Ringbreite. Bei einer Wabengröße von $20 \text{ mm} \times 1,2 \text{ mm}$ werden 120 Feldwaben beleuchtet, so daß sich eine ausreichende Homogenität der Scan-Energie ergibt. Die sammelnde Wirkung jeder Feldwabe ist so ausgelegt, daß
25 sie in der Blendenebene eine sekundäre Lichtquelle erzeugt.

Am Ort der sekundären Lichtquellen befinden sich die Pupillenwaben, die die Feldwaben in die Retikelebene abbilden. Der Ort der Pupillenwaben in der Blendenebene wird unabhängig von der Rasterung der Feldwaben gewählt.

30 Sie sind so angeordnet, daß sie in der Austrittspupille des Beleuchtungssystems eine vorgegebene Verteilung erzeugen. Beispielsweise

sind die Pupillenwaben auf einem radialen Gitter angeordnet. Zum Vorhalt von Pupillenaberrationen der nachfolgenden Feldlinse können sie auch auf einem verzeichneten Gitter angeordnet sein.

5 Jeder Feldwabe wird eine Pupillenwabe zugeordnet. Die Zuordnung von Feld- und Pupillenwaben kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Eine Möglichkeit ist, jeweils die räumlich benachbarten Waben zuzuordnen.

10 Dadurch werden die Umlenkwinkel minimal. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene zu homogenisieren. Dies kommt dann zum Tragen, wenn die Intensitätsverteilung in der Ebene der Feldwaben einen Verlauf aufweist. Haben Feld- und Pupillenwaben ähnliche Positionen, überträgt sich der Verlauf auf die Pupillenausleuchtung. Durch gezielte Durchmischung der Zuordnung kann die Intensität ausgeglichen werden. Durch Kipp von Feld- und Pupillenwabe werden die Strahlbüschel so
15 umgelenkt, daß die Bilder der Feldwaben in der Retikelebene überlagert werden.

20 Ohne Feldlinse wird in der Retikelebene ein Rechteckfeld ausgeleuchtet. Der ausgeleuchtete Ring in der Retikelebene wird von den grazing incidence Feldspiegeln geformt. Sie bilden zudem die Blendenebene des Beleuchtungssystems in die Eintrittspupille des Objektivs ab und können den Verlauf der Scan-Energie steuern.

25 Zur Steuerung der Ausleuchtung der Austrittspupille des Beleuchtungssystems können eine Auswahl von Feld- oder Pupillenwaben maskiert werden bzw. unbeleuchtet bleiben. Denkbar ist auch, die Pupillenwaben bereits so anzuordnen, daß sich eine vorgegebene Ausleuchtung in der Austrittspupille ergibt. Beispielsweise wird durch die Anordnung der Pupillenwaben ein Ring in der Austrittspupille ausgeleuchtet.
30 Durch Steuerung der Beleuchtung der Feldwabenplatte oder durch

Maskierung der Pupillenwabenplatte kann ein Wechsel zu
Quadrupolausleuchtung vorgenommen werden.

In den Fig. 4B-4M ist ein EUV-Beleuchtungssystem mit Wiggler-Quelle
gezeigt. Gleiche Bauteile wie in Fig. 1-4A sind mit denselben Bezugsziffern
belegt.

Fig. 4B zeigt eine schematische Darstellung des Kollektorspiegels 30 im y-z-
Schnitt. Die Quelle befindet sich im Abstand von 1700 mm vor dem
Kollektorspiegel.

Fig. 4C zeigt eine schematische Darstellung des Kollektorspiegel 30 im x-z-
Schnitt.

In Fig. 4D ist das Beleuchtungssystem im y-z-Schnitt gezeigt. Die Quelle ist
nicht eingezeichnet und befindet sich im Abstand von 1700 mm vor dem
Kollektorspiegel 30.

Dargestellt sind der Kollektorspiegel 30, der erste Spiegel mit
Rasterelementen, der auch als Feldwabenplatte 34 bezeichnet wird, der
zweite Spiegel mit Rasterelementen, der auch als Pupillenwabenplatte 37
bezeichnet wird, die Feldlinsen 36, 38 sowie die Retikelebene 39.

Fig. 4E zeigt eine schematische Darstellung der Feldwabenplatte 34.
Eingezeichnet ist auch die ringförmige Ausleuchtung. Zur besseren
Darstellung sind alle Waben bzw. Rasterelemente 42 in x-y-Richtung
ausgerichtet. Im realen System sind die Waben 42 durch Verkipfung um ihre
x- und y-Achse um ihre eigene z-Achse gedreht.

Fig. 4F zeigt eine schematische Darstellung der Pupillenwabenplatte 37. Die
Pupillenwaben 43 sind auf Speichen angeordnet.

In Fig. 4G sind die Aufpunkte der Feldwaben 42, wie sie im ausgeführten Beispiel angeordnet sind, dargestellt.

5 Fig. 4H zeigt die Aufpunkte der Pupillenwaben 43, wie sie sich ohne Feldlinse 36, 38 ergeben würden und Fig. 4I die Aufpunkte der Pupillenwaben 43, wie sie sich mit Feldlinse 36, 38 ergeben. Die verzeichnete Anordnung der Pupillenwaben 43 kompensiert die Pupillenaberrationen der Feldlinse 36, 38.

10 Fig. 4K zeigt die Ausleuchtung der Retikelebene 39 mit dem Ringfeld bei dem in Fig. 4B-4I gezeigten System.

In Fig. 4L sind Intensitätsschnitte in der Retikelebene 39 bei $x = 0,0$ mm, 15,0 mm, 30,0 mm, 45,0 mm dargestellt.

15 Fig. 4M zeigt den Verlauf der Scan-Energie, die sich als Integral über die Intensitätsverteilung entlang des Scan-Weges ergibt.

20 Die Lichtverteilung bzw. das Beleuchtungssetting in der Austrittspupille, die vorliegend mit der Objektivpupille zusammenfällt, wird bei kreisförmiger Ausleuchtung durch den Füllfaktor σ definiert. Es gilt:

Füllfaktor:

$$\sigma = \frac{r_{\text{Beleuchtung}}}{R_{\text{Objektivapertur}}}$$

25 Die Parameter $r_{\text{Beleuchtung}}$ und $R_{\text{Objektivapertur}}$ sind aus Figur 5 entnehmbar.

Definitionsgemäß ist für $\sigma = 1,0$ die Objektivpupille vollständig gefüllt; und beispielsweise $\sigma = 0,6$ entspricht einer Unterfüllung.

Bei einer annularen Lichtverteilung ist die Objektivpupille ringförmig ausgeleuchtet. Zu ihrer Beschreibung kann man folgende Definition von σ_{out}/σ_{in} verwendet:

$$\sigma_{out} = \frac{r(90)}{R(NA_{max})} \quad \text{wobei} \quad \int_0^{r(90)} I(r) r dr = 0,9 \cdot \int_0^{R(NA_{max})} I(r) r dr$$

$$\sigma_E = \frac{r(10)}{R(NA_{max})} \quad \text{wobei} \quad \int_0^{r(10)} I(r) r dr = 0,1 \cdot \int_0^{R(NA_{max})} I(r) r dr$$

Eine weitere im nachfolgenden untersuchte Lichtverteilung ist die sogenannte Quadrupol-Beleuchtung zur Abbildung von beispielsweise "Manhattan-Strukturen".

Wie die Figuren 6A bis 6D zeigen, kann durch gezielte Ausleuchtung 41 der Feldwabenplatte die Anzahl der sekundären Lichtquellen 44 und damit die Blendenausleuchtung variiert werden. Die Figuren 6A bis 6D zeigen die Ausleuchtung der Feldwabenplatte mit Rasterelementen 40 und die zugehörige Verteilung der sekundären Lichtquellen 44 in der Austrittspupille 49 des Beleuchtungssystems, die zugleich Eintrittspupille des nachgeschalteten Objektivs ist. Gleiche Bauteile, wie in den Fig. 3-5 werden in den Fig. 6A-6D mit denselben Bezugsziffern belegt.

Figur 6A zeigt die Ausleuchtung für einen Füllgrad $\sigma = 1,0$. In Figur 6B ist eine kreisförmige Ausleuchtung mit einem Füllgrad von $\sigma = 0,6$ dargestellt. Figur 6C zeigt ein annulares bzw. ringförmiges Setting mit

$$\frac{\sigma_{out}}{\sigma_{in}} = \frac{1,0}{0,7}$$

In Figur 6D ist eine Quadrupol-Beleuchtung der Feldwabenplatte dargestellt.

In den Figuren 7 bis 18 sind die Ergebnisse von Simulationsrechnungen für die in den Figuren 6A-6D gezeigten verschiedenen Beleuchtungsverteilungen dargestellt.

5 Folgende Settings bzw. Verteilungen werden beispielhaft beschrieben:

1. kreisförmiges Setting mit $\sigma = 1,0$
Ausleuchtung der Feldwabenplatte mit einem Radius von $r = 35,0$ mm, was einer Apertur von $NA_{\text{Ret}} = 0,025$ entspricht.

10 2. kreisförmiges Setting mit $\sigma = 0,6$
kreisförmige Ausleuchtung der Feldwabenplatte mit Radius $r = 20,0$ mm.

15 3. annulares Setting mit

$$\frac{\sigma_{\text{out}}}{\sigma_{\text{in}}} = \frac{1,0}{0,7}$$

ringförmige Ausleuchtung der Feldwabenplatte mit Radius $r_{\text{out}} = 35,0$ mm und $r_{\text{in}} = 25$ mm.

20 4. Quadrupol-Setting

vier kreisförmige Ausleuchtungen der Feldwabenplatte mit $r = 10$ mm auf den Diagonalen und mit einem Abstand $a = 21,2$ mm von der optischen Achse.

25 Die sich ergebende Pupillenausleuchtung bei Beleuchtung der Feldwabenplatte gemäß 1.- 4. wird für den Achspunkt

($x = 0,0$; $y = 0,0$) und einen Feldpunkt bei ($x = 40,0$; $y = 4,041$) am Rand berechnet und in den Figuren 7-14 dargestellt.

30

Für den Fall eines Füllgrades $\sigma = 1,0$ (Fall 1) ist die Pupille bis zur Maximal-Apertur von $NA_{\text{Ret}} = 0,025$ mit 213 sekundären Lichtquellen gleichmäßig gefüllt. In Figur 7 ist die Pupillenausleuchtung für den Feldpunkt in der Mitte der Retikelebene $x = 0, y = 0$ dargestellt.

Wie aus Figur 8 für den Punkt am Feldrand $x = 40,0, y = 4,041$ hervorgeht, bleibt die Form der Pupillenausleuchtung auch am Feldrand erhalten. Die Pupille gemäß Figur 8 ist insgesamt aber um den Offset des Schwerstrahlwinkels verschoben, wobei die optische Achse des Beleuchtungssystems in der Retikelebene das Bezugssystem darstellt.

Für einen Füllgrad von $\sigma = 0,6$ (Fall 2) ist die Pupille bis zur Apertur von $NA_{\text{Ret}} = 0,6 \cdot 0 \cdot 0,025 = 0,015$ mit 72 sekundären Lichtquellen gefüllt. Die Pupillenausleuchtung für den Feldpunkt in der Mitte der Retikelebene ($x = 0, y = 0$) ist in Figur 9 gezeigt; die für den Feldpunkt am Rand ($x = 40,0, y = 4,041$) in Figur 10.

Für ein ringförmiges Setting (Fall 3) mit

$$\frac{\sigma_{\text{out}}}{\sigma_{\text{in}}} = \frac{1,0}{0,7}$$

ist die Pupille zwischen der Apertur $NA_{\text{out}} = 0,025$ und $NA_{\text{in}} = 0,0175$ mit 102 sekundären Lichtquellen gefüllt. Die Ausleuchtung für den Feldpunkt in der Mitte der Retikelebene ($x = 0, y = 0$) ist in Figur 11 gezeigt; die für den Punkt am Feldrand ($x = 40,0, y = 4,041$) in Figur 12.

Bei Ausleuchtung der Wabenplatte mit einer Quadrupol-Beleuchtung (Fall 4) wird die Austrittspupille in den vier Segmenten mit jeweils 18 sekundären Lichtquellen gefüllt. Figur 13 zeigt die Ausleuchtung für einen Punkt in der Feldmitte, Figur 14 für einen Punkt am Feldrand.

Die Auswertung der Scan-Uniformität für die unterschiedlichen Beleuchtungssettings ist in den Figuren 15 bis 18 dargestellt. Es zeigt sich eine Abhängigkeit von der Beleuchtung der Wabenplatte, d.h. vom Setting.

5 Für einen Füllgrad $\sigma = 1,0$ bei kreisförmiger Ausleuchtung zeigt sich ein idealer Verlauf der Scan-Energie mit Uniformitäts-Einbußen $< 1 \%$, wie aus Fig. 15 zu sehen.

10 Für einen Füllgrad $\sigma = 0,6$ bei kreisförmiger Ausleuchtung zeigen sich durch die Verringerung der Anzahl der am Mischprozeß beteiligten Feldwaben Uniformitäts-Einbußen von 2% wie aus Figur 16 hervorgeht. Die Anzahl der Feldwaben betrug in dem vorangegangenen Beispiel für Füllgrad $\sigma = 1,0$ 213 Feldwaben, wohingegen bei $\sigma = 0,6$ nur 72 Feldwaben ausgeleuchtet werden und damit am Mischprozeß beteiligt sind.

15 Bei annularer Beleuchtung werden viele Feldwaben nur teilweise beleuchtet. Das hat zur Folge, daß bei Beteiligung von 102 Feldwaben gegenüber 213 Feldwaben bei $\sigma=1,0$ am Mischprozeß die Uniformitäts-Einbuße 3% , wie in Figur 17 gezeigt, beträgt. Die größere Uniformitäts-Einbuße bei annularer Beleuchtung gegenüber kreisförmiger Beleuchtung mit $\sigma = 0,6$ trotz der Beteiligung von mehr Feldwaben am Mischprozeß ist auf die nur teilweise Beleuchtung der Feldwaben zurückzuführen.

20 Bei Quadrupol-Beleuchtung zeigt die Scan-Energie eine charakteristische "4-Welligkeit" mit einer Uniformität von 5% , wie aus Figur 18 hervorgeht. Diese kommt dadurch zustande, daß je nach Feldpunkt bei Quadrupol-Beleuchtung zusätzliche Feldwaben zur Beleuchtung beitragen können oder wegfallen und fast alle Feldwaben nur teilweise ausgeleuchtet sind.

25 Wie aus der beschriebenen Simulation hervorgeht, wird die variable Pupillenausleuchtung durch die geforderte Uniformität der Intensitätsverteilung.

30

bei Stepper-Systemen bzw. Uniformität der Scan-Energie bei Scanner-Systemen limitiert. Allgemein gilt, daß je weniger Wabenbilder in der Retikelebene überlagert werden, desto schlechter die Durchmischung und somit die Uniformität der Feldausleuchtung ist. Möchte man für extreme Pupillenverteilungen, d.h. kleines σ bei kreisförmiger Ausleuchtung oder schmaler Ring bei annularer Ausleuchtung oder Quadrupol, die Uniformität steigern, so muß die Anzahl der Waben erhöht werden, was bei gleichbleibenden Abmessungen der Feldwabenplatte eine Verringerung der Wabenabmessungen und eine Erhöhung des Wabenabbildungsmaßstabes bedeutet.

Aufgrund des hohen Aspektverhältnisses von 17,5:1 der Waben in vorliegenden Ausführungsbeispielen werden die Waben am Rand der beleuchteten Fläche nur teilweise ausgeleuchtet. Figur 19 zeigt eine Konfiguration, bei der in jeder x-Zeile 98 nur zwei Feldwaben 100,102 ausgeleuchtet werden. Jede Wabe 100,102, die beleuchtet wird, erzeugt in der Blendenebene des Beleuchtungssystems eine sekundäre Lichtquelle 104. Die Verteilung der sekundären Lichtquellen 104 in der Blendenebene bei kreisrunder Beleuchtung der Feldwabenplatte ist folglich elliptisch, da in x-Richtung weitere sekundäre Lichtquellen hinzukommen. Die Pupillenausleuchtung jedes einzelnen Feldpunktes in der Retikelebene bleibt jedoch kreisrund, da nicht jeder Feldpunkt Licht von jeder sekundären Lichtquelle bekommt. Anschaulich gesprochen wird die Pupillenverteilung für den Feldrand rechts- bzw. linkslastig, wie in Figur 20 dargestellt.

- Zur Reduzierung des Aspektverhältnisses können die einzelnen Waben so ausgebildet werden, daß sie eine anamorphotische Wirkung aufweisen, wie beispielsweise in der DE 199 31 848.4, eingereicht am 09.07.1999, für die Anmelderin beschrieben, deren Offenbarungsgehalt in die vorliegende Anmeldung vollumfänglich mit aufgenommen wird.

In Fig. 21 und 22 sind zwei Feldwabenplatten 34 mit gleicher Anzahl Feldwaben 42 dargestellt, wobei jedoch das Aspektverhältnis bzw. die Größe der Feldwaben 42 unterschiedlich ist. Das Aspektverhältnis der Waben 42.1 in Fig. 21 beträgt $17,5 : 1$; das der Waben 42.2 in Fig. 22 $1:1$. Wie aus dem Vergleich von Fig. 21 und Fig. 22 zu entnehmen, sind bei gleich großer Ausleuchtung 51 der Wabenplatten in Fig. 21 und Fig. 22 im Fall der quadratischen Waben 42.2 mehr Waben vollständig ausgeleuchtet als im Fall der Waben 42.1 mit hohem Aspektverhältnis. Dadurch ist die Uniformität der Ausleuchtung im Fall der quadratischen Waben homogener als im Fall einer Wabenplatte mit Waben mit hohem Aspektverhältnis.

Ansprüche

1. Beleuchtungssystem für Wellenlängen ≤ 193 nm, insbesondere für die EUV-Lithographie mit
 - 1.1 mindestens einer Lichtquelle (1);
 - 1.2 mindestens einer Spiegel- oder Linsenvorrichtung, umfassend mindestens einen Spiegel oder eine Linse (34), der bzw. die in Rasterelemente (10, 40, 100, 102) gegliedert ist;
 - 1.3 einem oder mehreren optischen Elementen (36, 38), die die Blendenebene (16) des Beleuchtungssystems in die Austrittspupille (39) des Beleuchtungssystems abbildet bzw. abbilden, dadurch gekennzeichnet, daß
 - 1.4 Mittel zum Erzeugen einer vorbestimmten Lichtverteilung in der Austrittspupille (39) des Beleuchtungssystems zwischen Lichtquelle und sekundärer Lichtquelle oder am Ort der sekundären Lichtquellen vorgesehen sind und
 - 1.5 die Anzahl und/oder Form der Rasterelemente (42.1, 42.2), die von den Mitteln zum Erzeugen einer entsprechenden Lichtverteilung beleuchtet werden, derart gewählt wird, daß eine vorbestimmte Uniformität der Felddausleuchtung in der Objekt- beziehungsweise Retikelebene erreicht wird.
2. Beleuchtungssystem gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zum Erzeugen einer Lichtverteilung am Ort der sekundären Lichtquellen eine Maskierungsvorrichtung umfassen.
3. Beleuchtungssystem gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zum Erzeugen einer Lichtverteilung vor dem Spiegel oder der Linse mit Rasterelementen angeordnet sind.

4. Beleuchtungssystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Erzeugung der Lichtverteilung einen Scan-Spiegel umfassen.
5. Beleuchtungssystem nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Scan-Spiegel ansteuerbar ist.
6. Beleuchtungssystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Erzeugung der Lichtverteilung ein optisches System mit Zoom-Wirkung umfaßt.
7. Beleuchtungssystem nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die durch das optische System mit Zoom-Wirkung beleuchtete Ebene die des Spiegels oder der Linse mit Rasterelementen ist.
8. Beleuchtungssystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Erzeugung der Lichtverteilung einen Spiegel oder eine Linse mit deformierbarer Oberfläche umfassen.
9. Beleuchtungssystem gemäß Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Spiegel oder die Linse mit deformierbarer Oberfläche eine Vielzahl von Manipulatoren umfaßt.
10. Beleuchtungssystem gemäß Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Manipulatoren an der Spiegelunterseite angeordnet sind.
11. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 8 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Manipulatoren Piezoelemente und/oder Elemente für eine elektromagnetische Anregung zur Erzeugung der Deformation umfassen.

12. Beleuchtungssystem nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Piezoelemente und/oder Elemente für die elektromagnetische Anregung ansteuerbar sind.
- 5 13. Beleuchtungssystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Erzeugung der Lichtverteilung ein zusätzlicher Spiegel mit Rasterelementen ausgestaltet als reflektive Einzelwaben ist. Sind,
- 10 14. Beleuchtungssystem nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Einzelwaben sammelnd, zerstreuend oder diffraktiv ausgebildet sind.
- 15 15. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 13 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß der zusätzliche Spiegel mit Rasterelementen austauschbar ist.
- 20 16. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Uniformität der Intensitätsverteilung innerhalb eines vorgegebenen Feldes $< 10 \%$, vorzugsweise $< 5 \%$, besonders bevorzugt $< 1\%$ ist.
- 25 17. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtverteilung in der Austrittspupille kreisförmig ist.
18. Beleuchtungssystem nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Füllgrad der kreisförmig ausgeleuchteten Austrittspupille $\sigma \leq 1,0$, insbesondere $\sigma \leq 0,6$ ist.

19. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtverteilung in der Austrittspupille ringförmig ist.
- 5 20. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtverteilung in der Austrittspupille eine Quadrupolverteilung ist.
- 10 21. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 20 dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des Spiegels oder der Linse derart geformt sind, daß sie anamorphotische Wirkung aufweisen.
- 15 22. Beleuchtungssystem nach Anspruch 21 dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des Spiegels oder der Linse zylinder- und/oder toroidförmig zur Erzeugung einer anamorphotischen Wirkung ausgebildet sind.
- 20 23. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des ersten Spiegels oder Linse rechteckige Form aufweisen.
- 25 24. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß das Aspektverhältnis des auszuleuchtenden Feldes größer als 2:1, insbesondere 13:1, vorzugsweise 17,5:1 ist.
25. Beleuchtungssystem nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des ersten Spiegels oder Linse ein Aspektverhältnis aufweisen, das kleiner als das Aspektverhältnis des Feldes ist.

26. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Erzeugung einer vorbestimmten Lichtverteilung eine Wechseloptik umfassen.
- 5 27. Beleuchtungssystem für Wellenlängen ≤ 193 nm, insbesondere für die EUV-Lithographie mit
- 27.1 mindestens einer Lichtquelle (1);
- 27.2 mindestens einer Spiegel- oder Linsenvorrichtung, umfassend mindestens einen Spiegel oder eine Linse (34), der beziehungsweise
- 10 die in Rasterelemente (10, 40, 100, 102) gegliedert ist;
- 27.3 einem oder mehreren optischen Elementen (36, 38), das beziehungsweise die von der Spiegel- oder Linsenvorrichtung mit Rasterelementen erzeugten sekundären Lichtquellen in die Austrittspupille (39) des Beleuchtungssystems abbildet
- 15 beziehungsweise abbilden, wobei
- 27.4 die Spiegel- oder Linsenvorrichtung und die optischen Elemente des Beleuchtungssystems derart angeordnet sind, daß ein Zwischenbild ausgebildet wird
- dadurch gekennzeichnet, daß
- 20 27.5 am Ort oder nahe am Ort des Zwischenbildes Z Mittel zum Erzeugen einer vorbestimmten Lichtverteilung in der Austrittspupille (39) des Beleuchtungssystems angeordnet sind.
28. Beleuchtungssystem nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, daß
- 25 die Mittel zur Erzeugung einer vorbestimmten Ausleuchtung Spiegel mit deformierbarer Oberfläche umfassen.
29. Beleuchtungssystem nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, daß die Spiegel oder Linse mit deformierbarer Oberfläche eine Vielzahl von Manipulatoren umfaßt.
- 30

30. Beleuchtungssystem nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, daß die Manipulatoren an der Spiegelunterseite angeordnet sind.
- 5 31. Beleuchtungssystem nach Anspruch 29 oder 30, dadurch gekennzeichnet, daß die Manipulatoren Piezoelemente und/oder Elemente für eine elektromagnetische Anregung zur Erzeugung der Deformation umfassen.
- 10 32. Beleuchtungssystem nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Piezoelemente und/oder Elemente für elektromagnetische Anregung ansteuerbar sind.
- 15 33. Beleuchtungssystem nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, daß die deformierbare Oberfläche derart angesteuert wird, daß dynamische Deformationen mit kleiner Ortsfrequenz hervorgerufen werden.
- 20 34. Beleuchtungssystem nach Anspruch 33, dadurch gekennzeichnet, daß die dynamischen Deformationen kleiner Ortsfrequenz derart gewählt werden, daß die diskreten sekundären Lichtquellen in der Austrittspupille so verschmiert werden, daß sie diese im zeitlichen Mittel weitgehend füllen.
- 25 35. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 27 bis 33, dadurch gekennzeichnet, daß die Uniformität der Intensitätsverteilung innerhalb eines vorgegebenen Feldes $< 10 \%$, vorzugsweise $< 5 \%$, besonders bevorzugt $< 1 \%$ ist.
- 30 36. Beleuchtungssystem nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Erzeugung der Lichtverteilung einen zusätzlichen Spiegel mit Rasterelementen, ausgestaltet als reflektive Einzelwaben, umfaßt.

37. Beleuchtungssystem nach Anspruch 36, dadurch gekennzeichnet, daß die Einzelwaben sammelnd, zerstreuend oder diffraktiv ausgebildet sind.
- 5 38. Beleuchtungssystem nach Anspruch 36, dadurch gekennzeichnet, daß der zusätzliche Spiegel mit Rasterelementen austauschbar ist.
39. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 25 bis 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtverteilung in der Austrittspupille kreisförmig ist.
40. Beleuchtungssystem nach Anspruch 39 dadurch gekennzeichnet, daß der Füllgrad der kreisförmig ausgeleuchteten Austrittspupille $\sigma \leq 1.0$, insbesondere $\sigma \leq 0.6$ ist.
- 15 41. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 27 bis 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtverteilung in der Austrittspupille ringförmig ist.
- 20 42. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 27 bis 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtverteilung in der Austrittspupille eine Quadrupolverteilung ist.
- 25 43. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 27 bis 42, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des Spiegels oder der Linse derart geformt sind, daß sie anamorphotische Wirkung aufweisen.
- 30 44. Beleuchtungssystem nach Anspruch 43, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des Spiegels oder der Linse zylinder- und/oder toroidförmig zur Erzeugung einer anamorphotischen Wirkung ausgebildet sind.

45. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 27 bis 44, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des ersten Spiegels oder Linse rechteckige Form aufweisen.
- 5 46. Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 27 bis 45, dadurch gekennzeichnet, daß das Aspektverhältnis des auszuleuchtenden Feldes größer als 2:1, insbesondere 13:1 17,5:1 ist.
- 10 47. Beleuchtungssystem nach Anspruch 46, dadurch gekennzeichnet, daß die Rasterelemente des ersten Spiegels oder Linse ein Aspektverhältnis aufweisen, das kleiner als das Aspektverhältnis des Feldes ist.
- 15 48. EUV-Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie mit einem Beleuchtungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 47, einer Maske, einem Projektionsobjektiv sowie einem lichtempfindlichen Objekt, insbesondere einem Wafer auf einem Trägersystem.
- 20 49. EUV-Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie gemäß Anspruch 48, ausgeführt als Scanning-System.
- 25 50. EUV-Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie gemäß Anspruch 49, dadurch gekennzeichnet, daß die Uniformität der Scan-Energie innerhalb eines vorgegebenen Feldes $< 10\%$, bevorzugt $< 5\%$, besonders bevorzugt $< 1\%$, ist.
51. Verfahren zur Herstellung mikroelektronischer Bauelemente, insbesondere Halbleiterchips mit einer EUV-Projektionsbelichtungsanlage gemäß einem der Ansprüche 48 bis 50.

Ø k.-f.h.

01-10-99

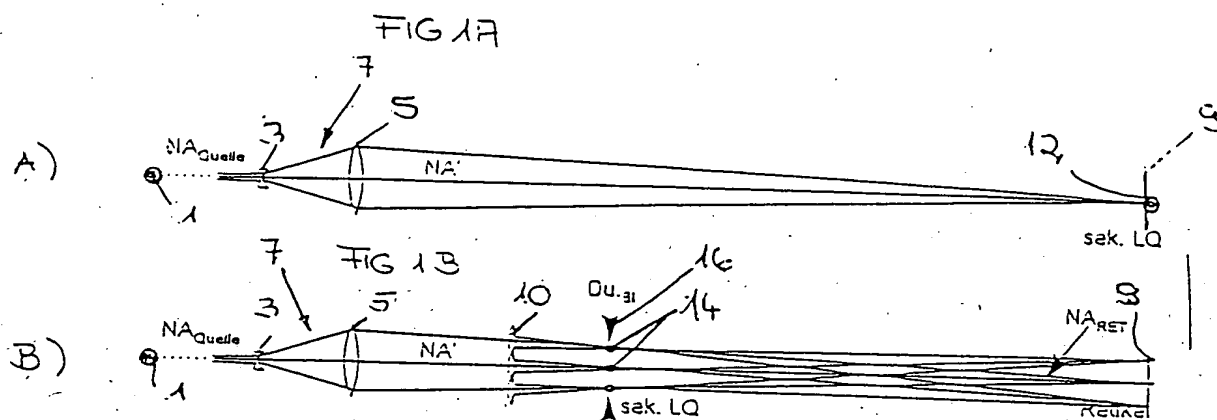


FIG. 3A

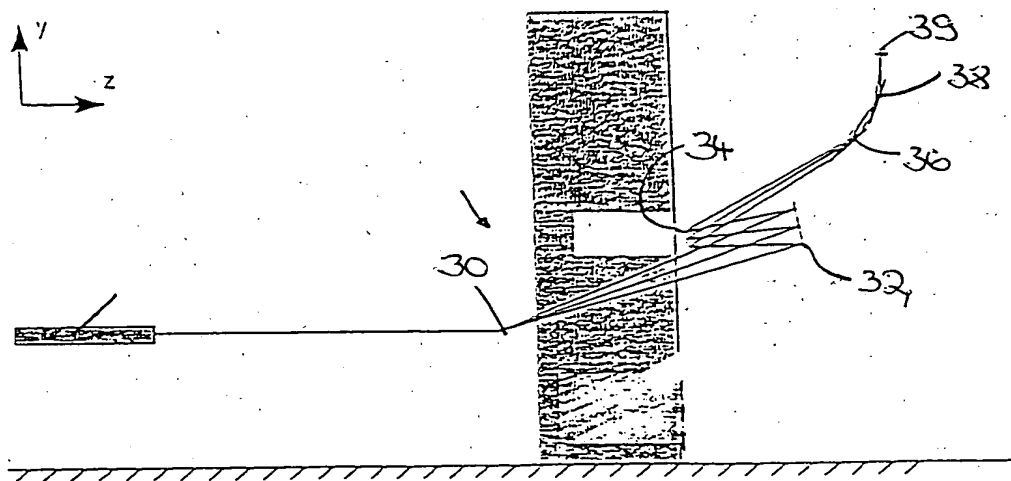


FIG. QB

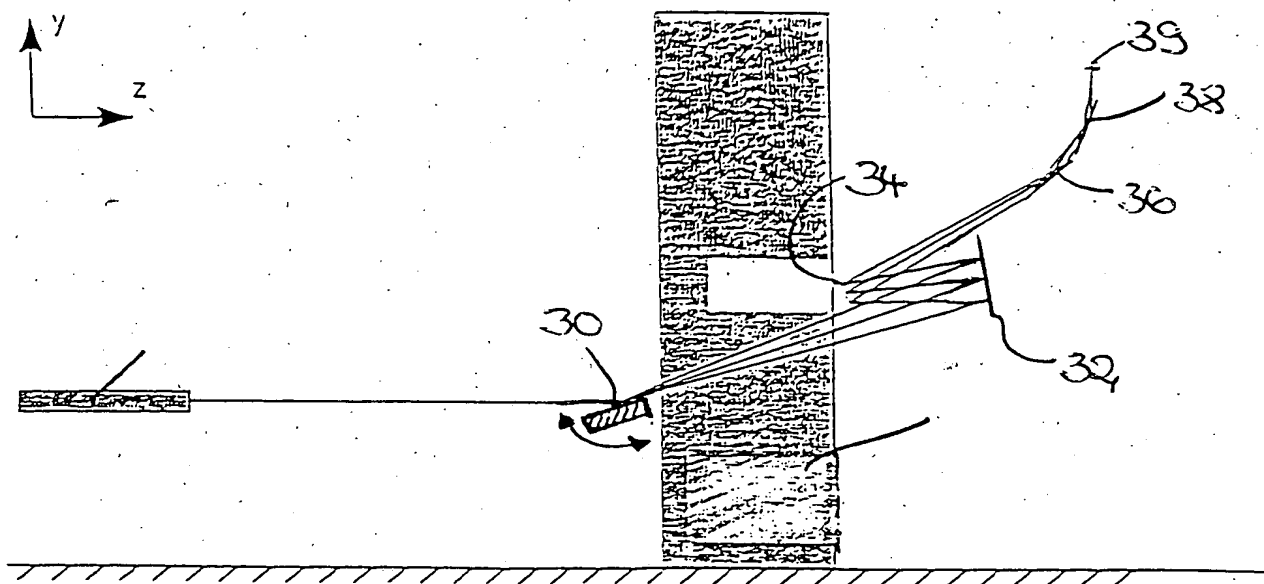


FIG. 2C

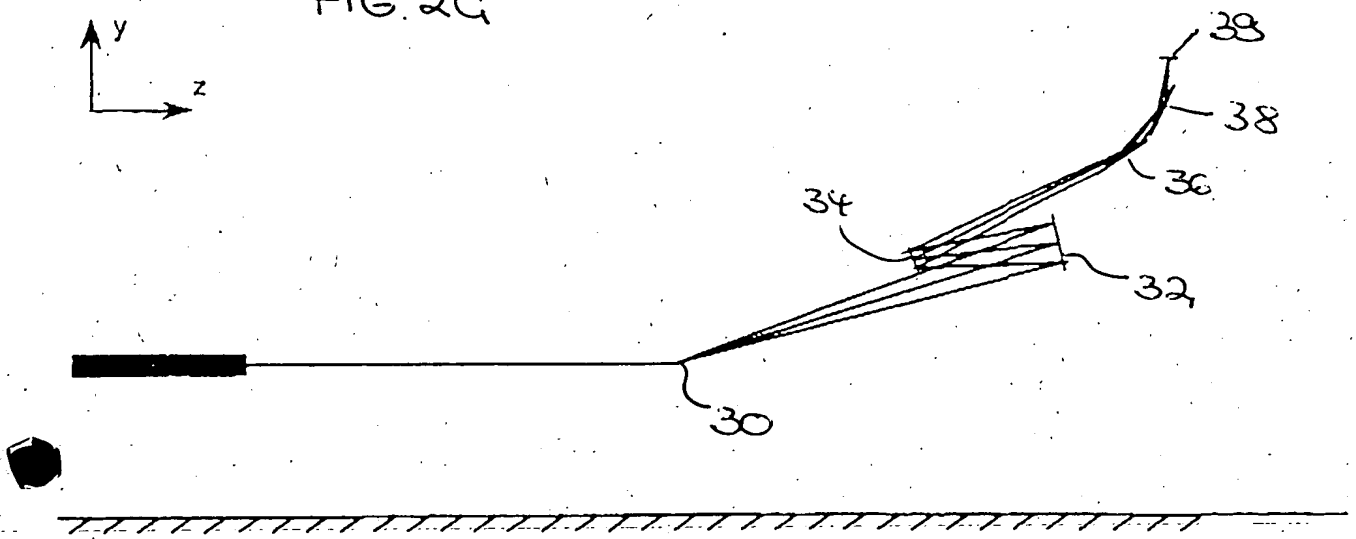
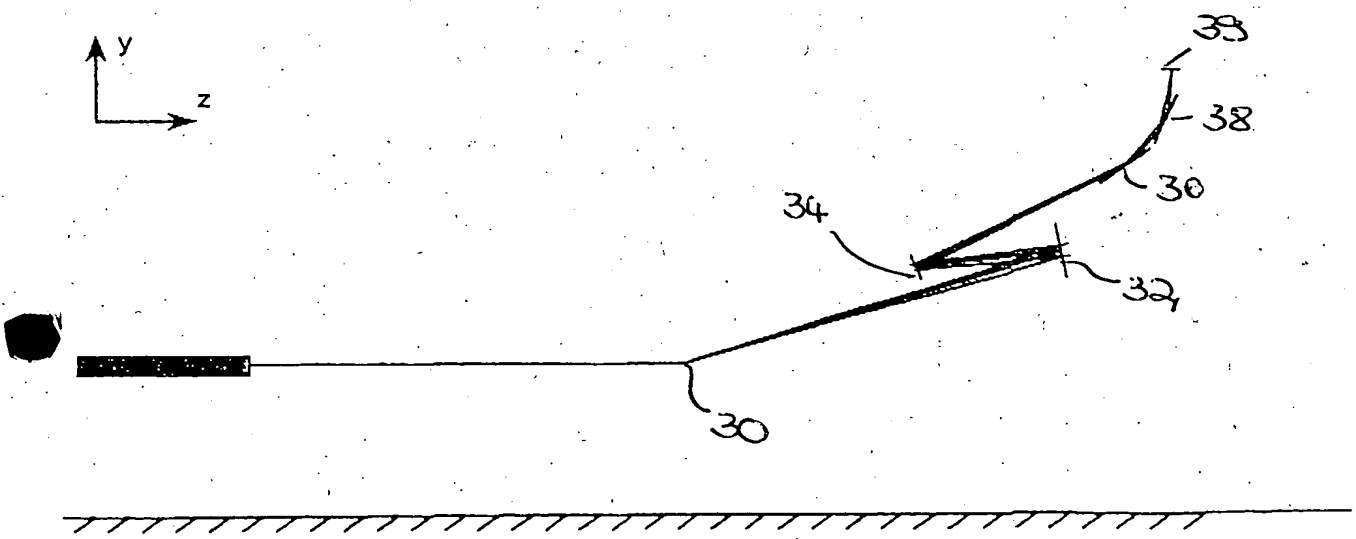


FIG. 2D



0140710

FIG. 2E

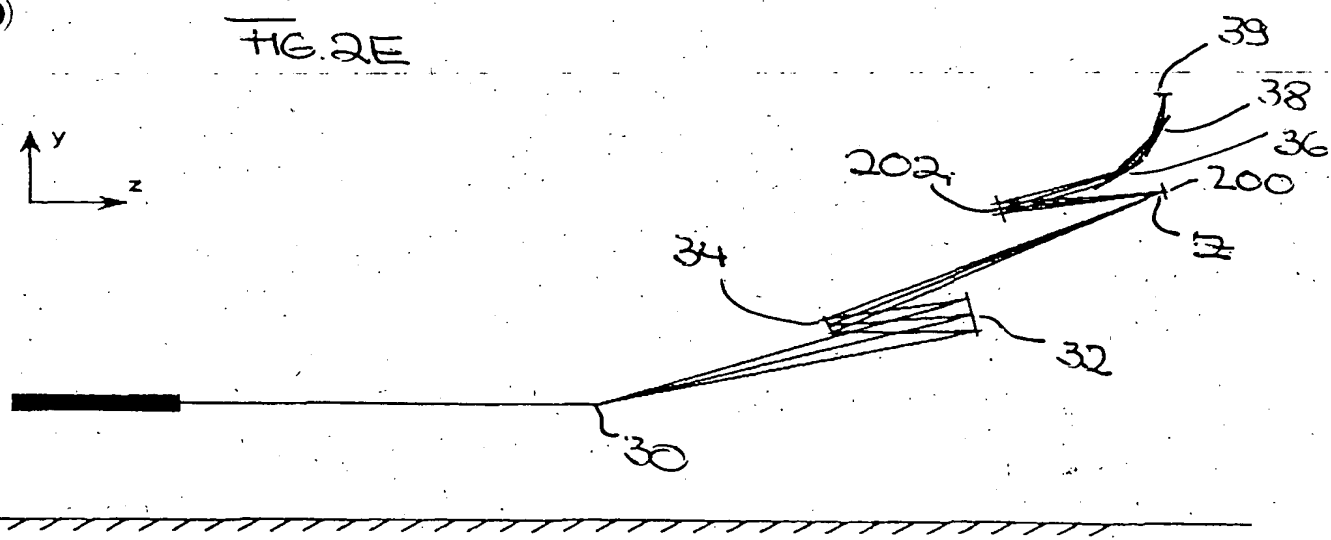


FIG. 2F

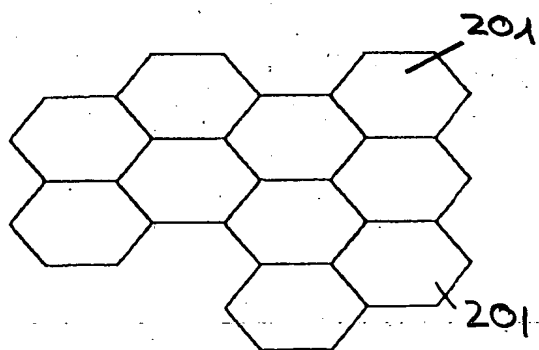
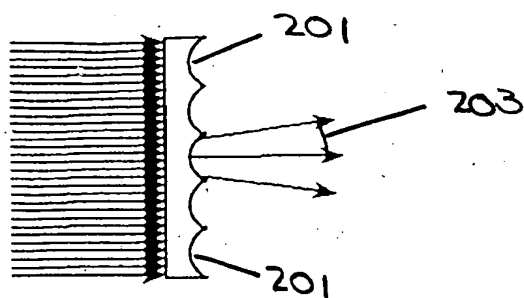


FIG. 2G



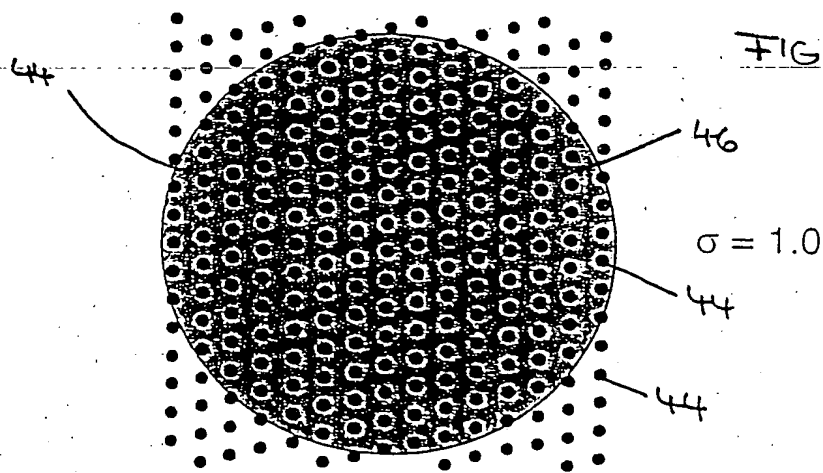
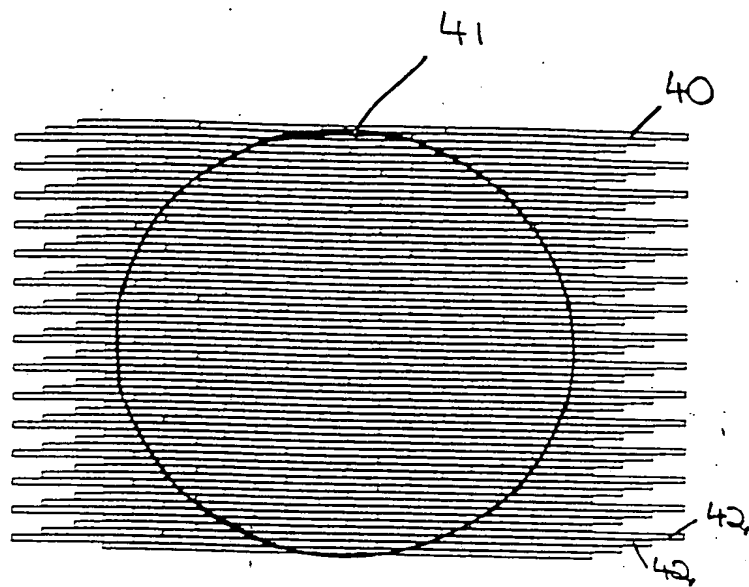
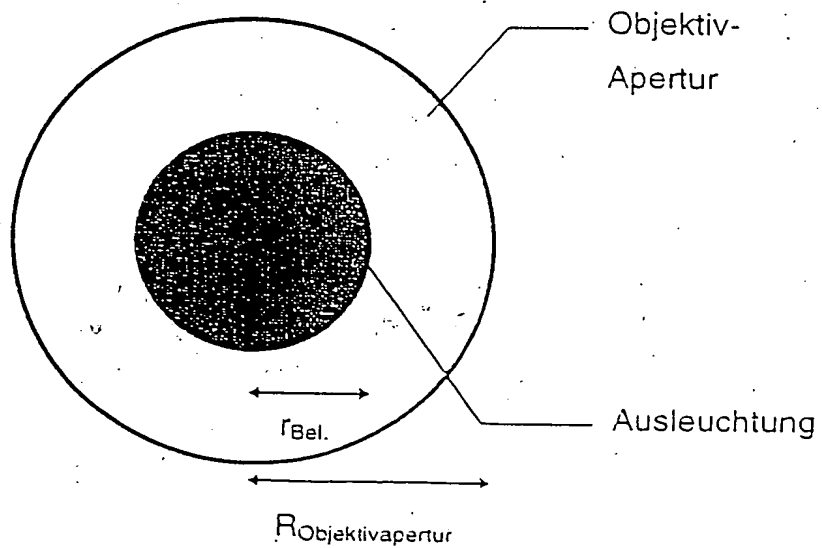
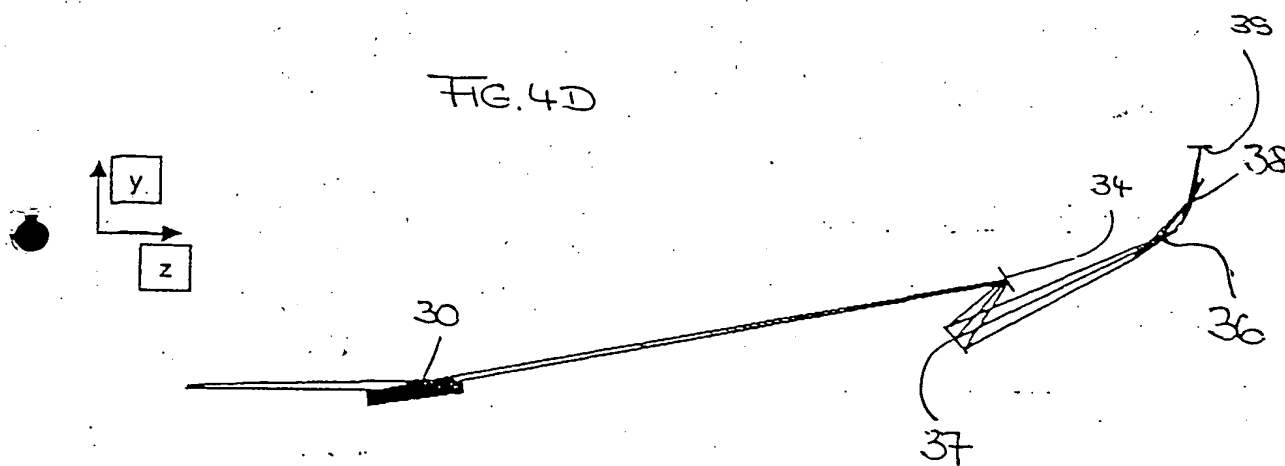
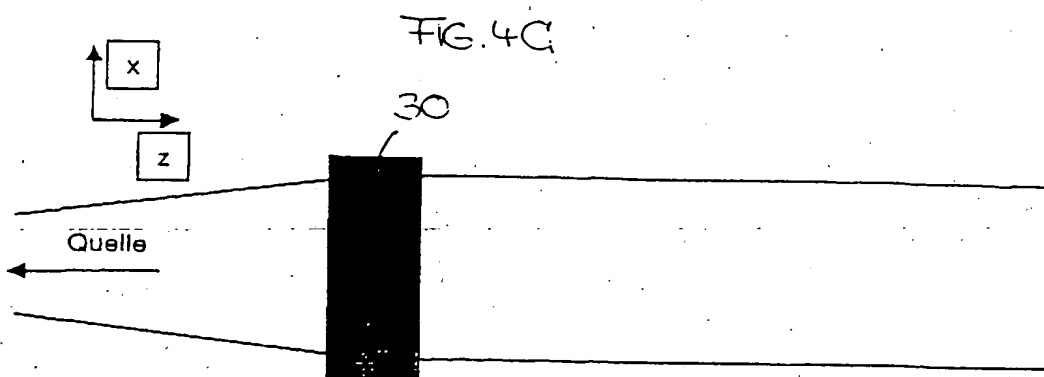
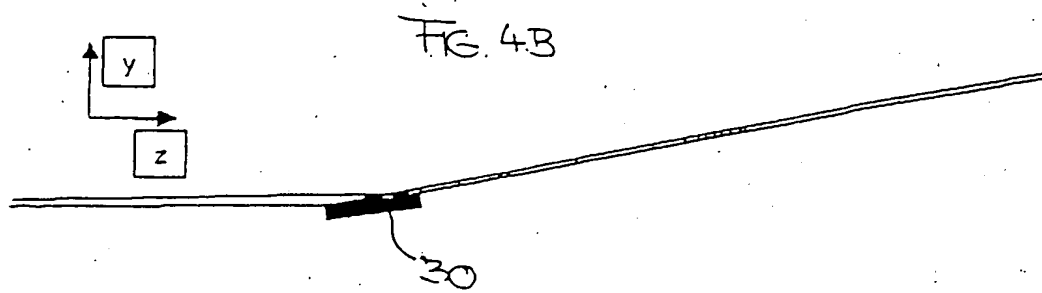


FIG 5





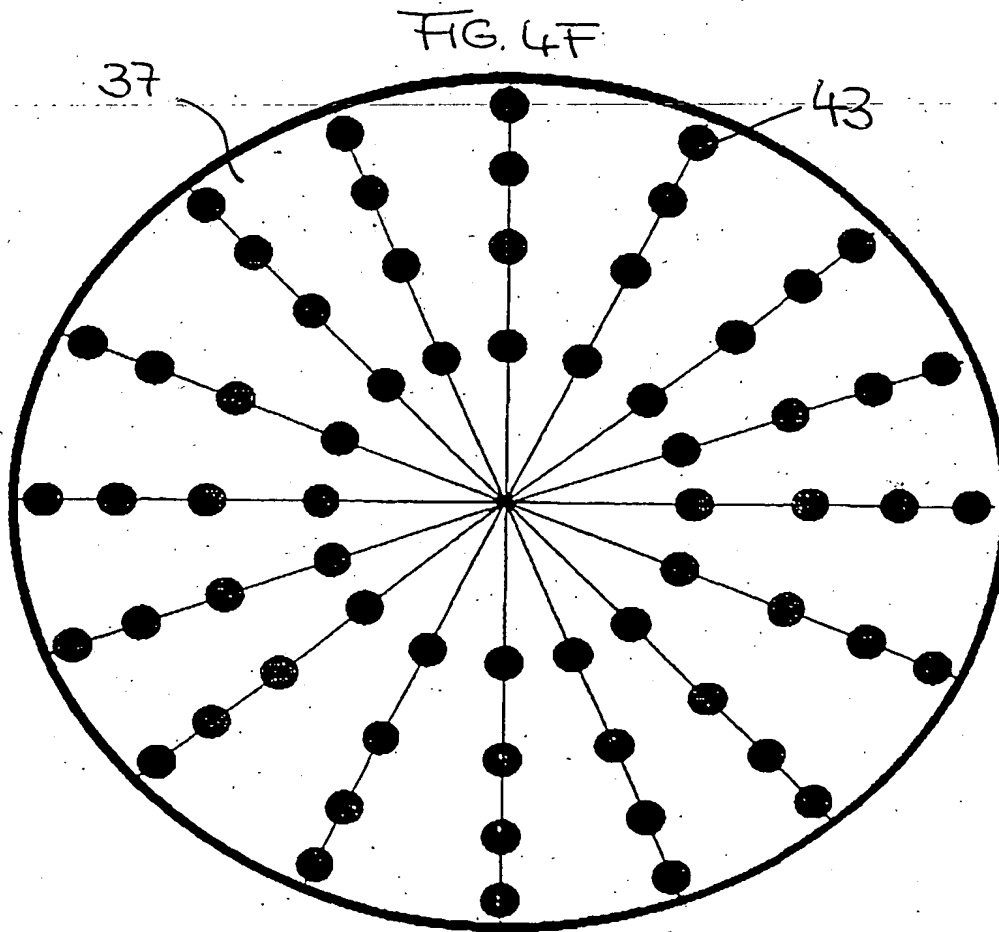
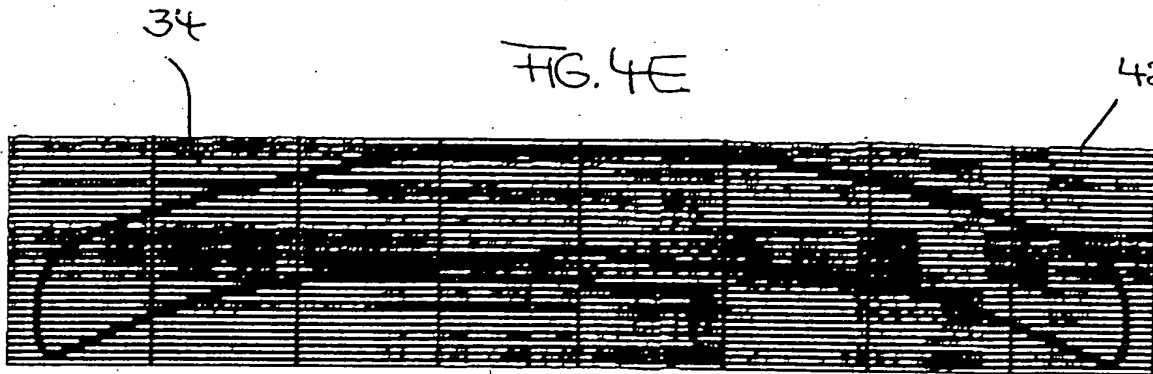


FIG. 4G

Anordnung der Feldwaben

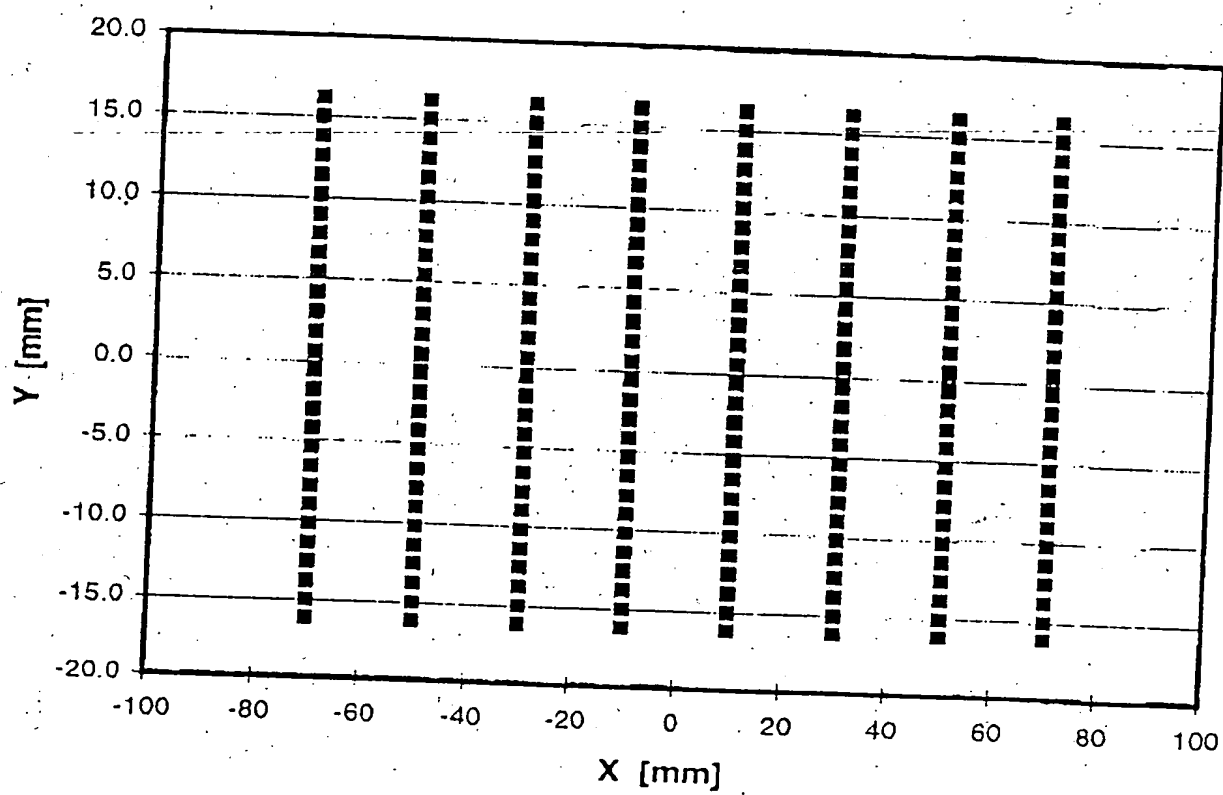


FIG. 4H

Anordnung der Pupillenwaben
In der Blendenebene des Beleuchtungssystems
ohne Feldlinse

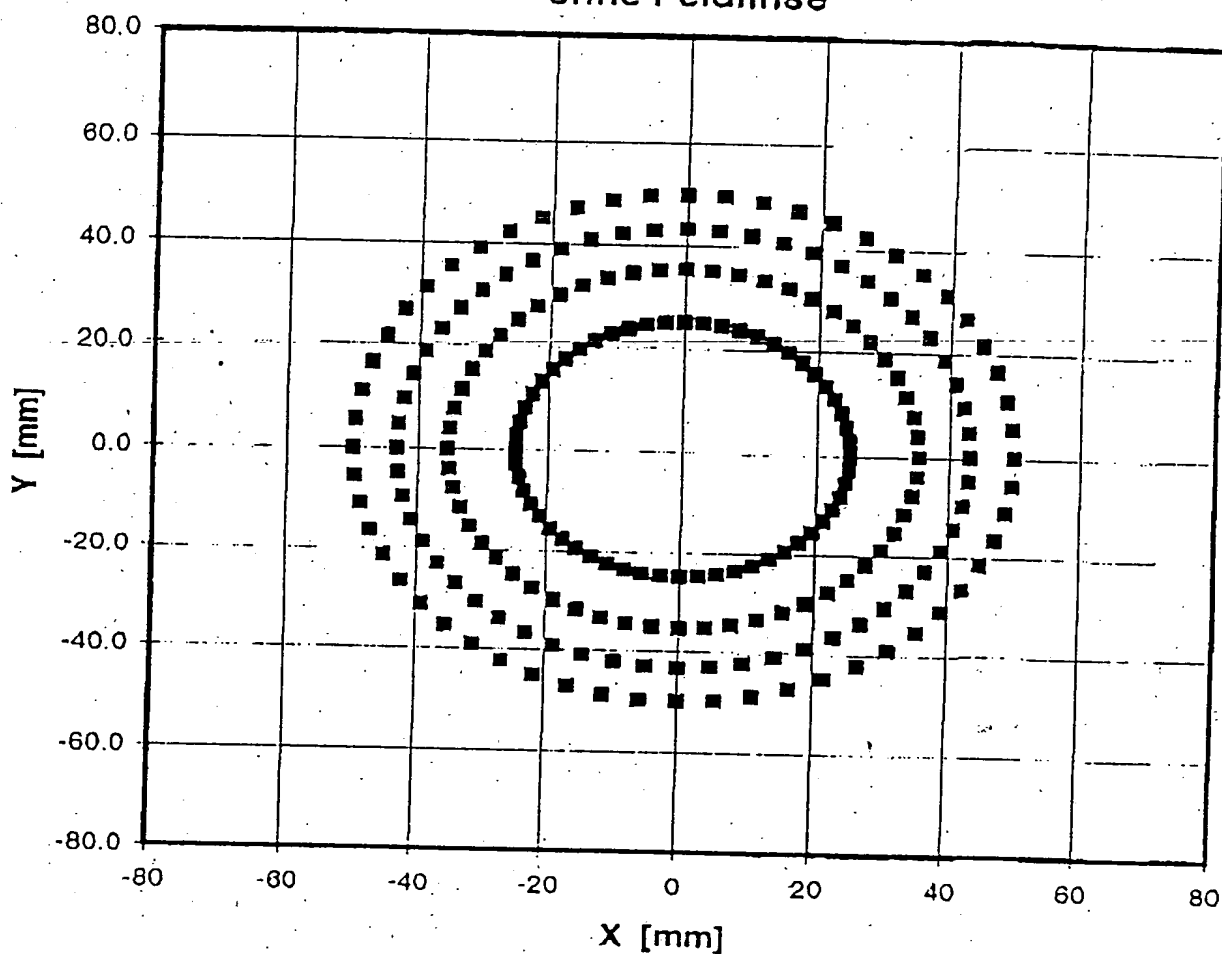
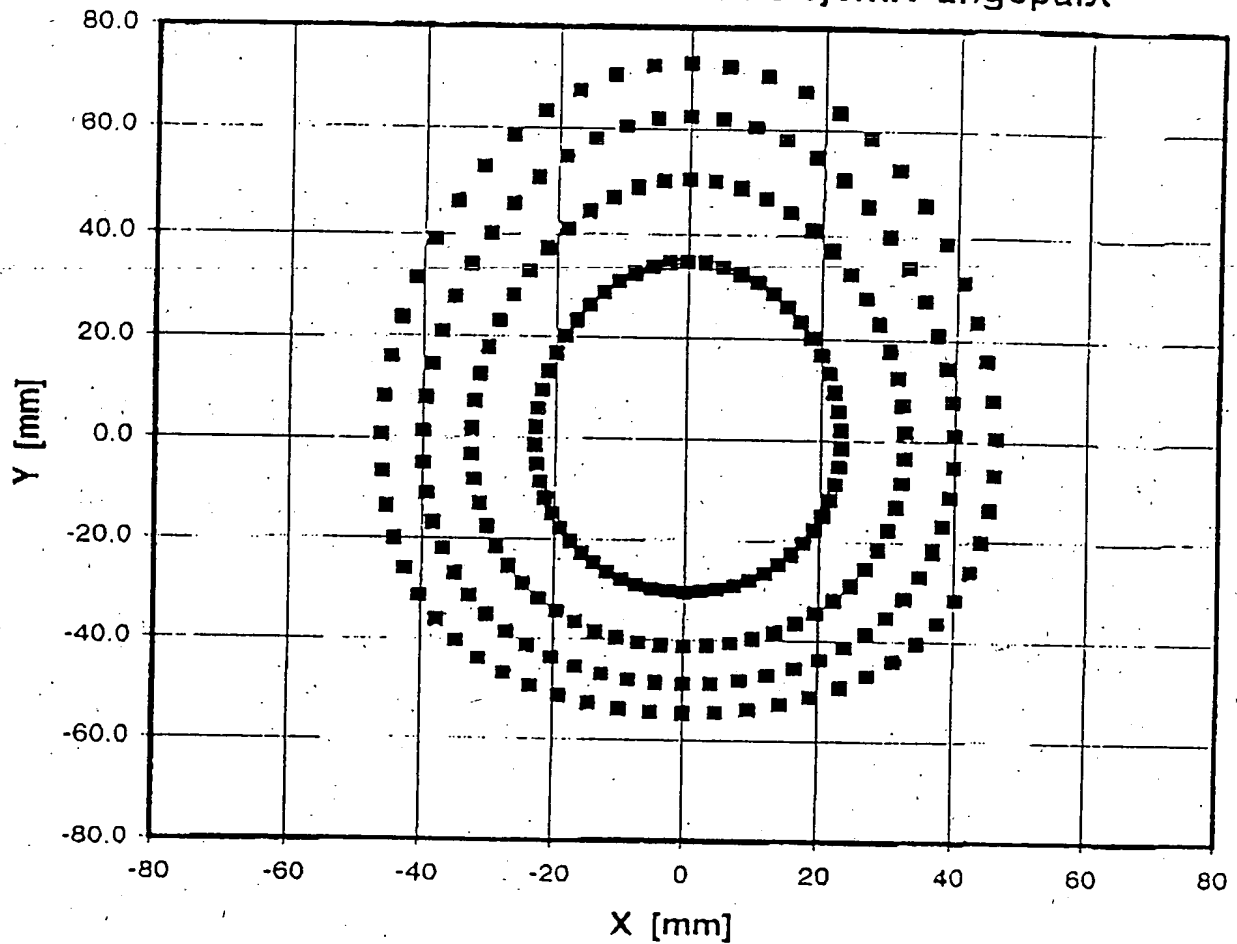


FIG. 4I

Anordnung der Pupillenwaben
In der Blendenebene des Beleuchtungssystems
Position an Feldlinse und Objektiv angepaßt



**Ausleuchtung der Retikelebene
mit Doppelfacetten-Wako mit Feldlinse;
Punktlichtquelle**

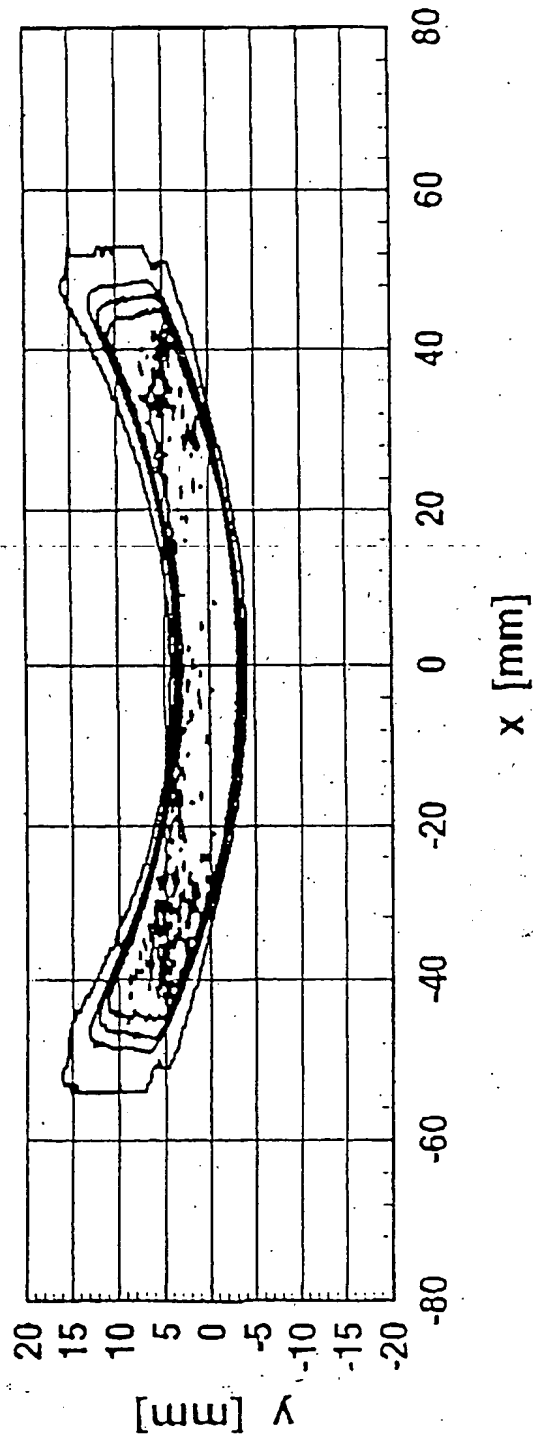


FIG. 4K

FIG. 4L

Intensitätsverlauf in Scanrichtung
Doppelfacetten-WaKo für Wiggler-Quelle

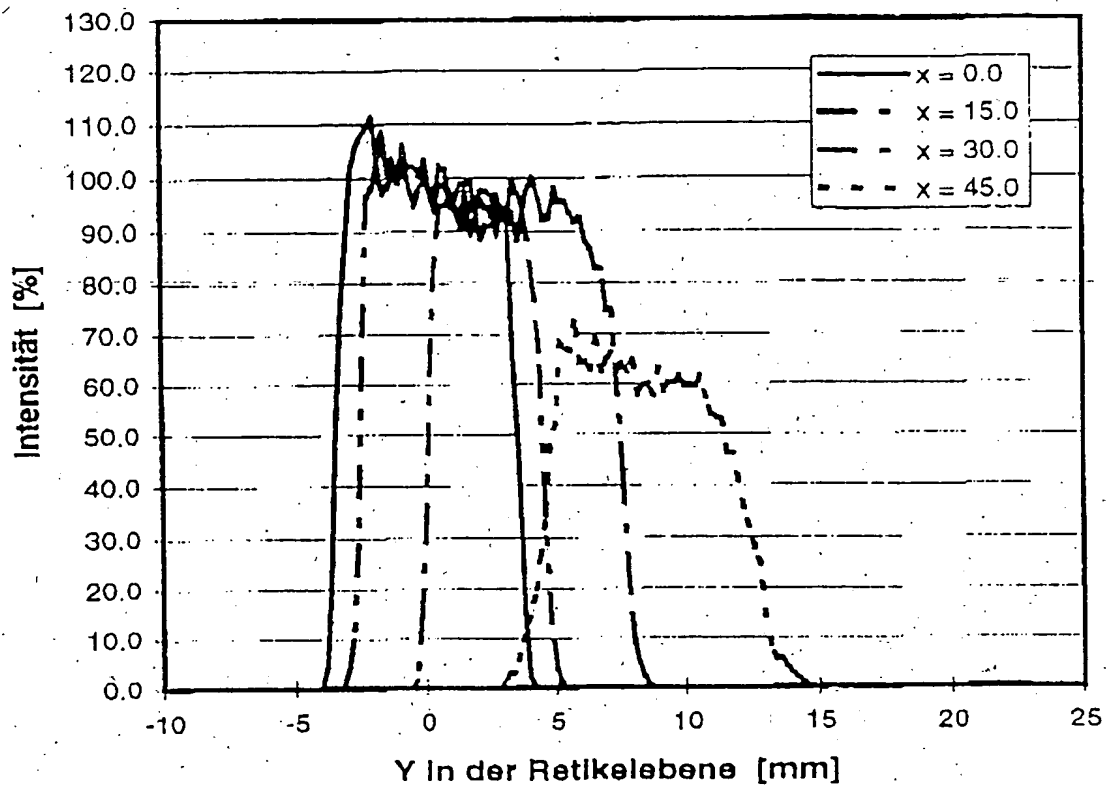
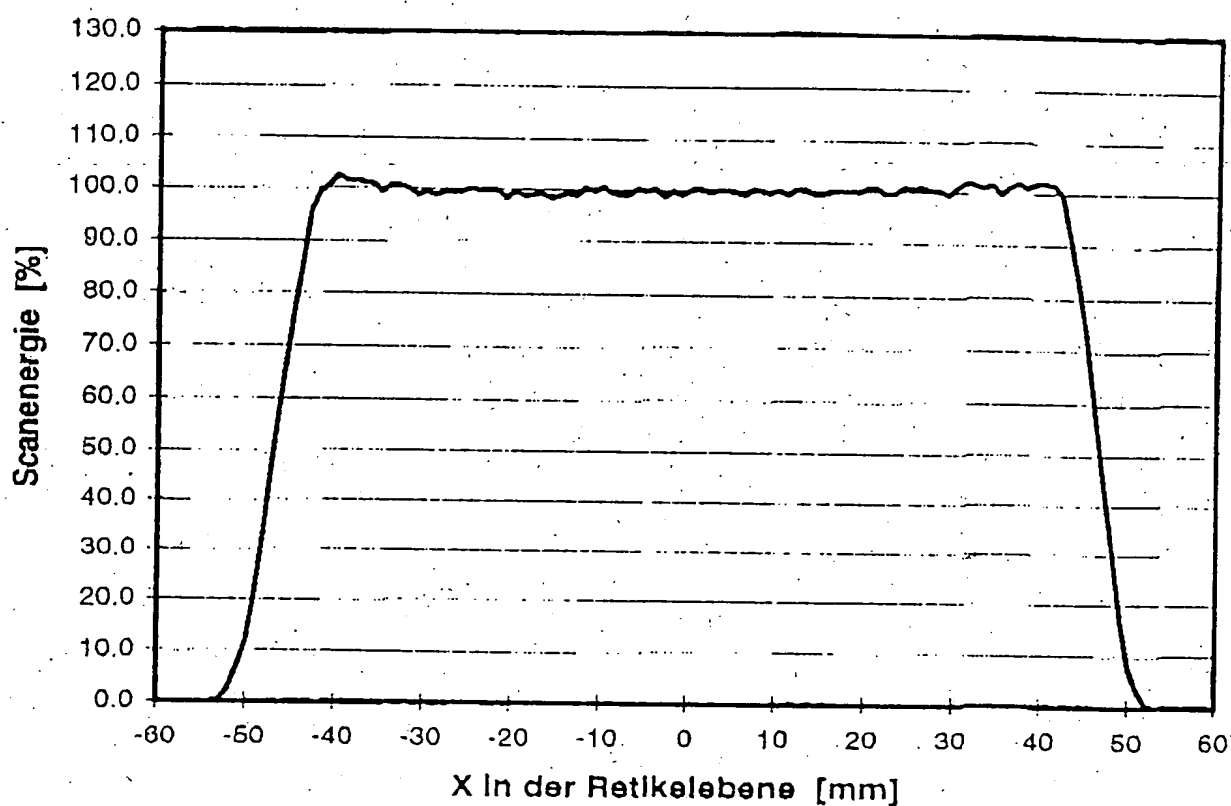
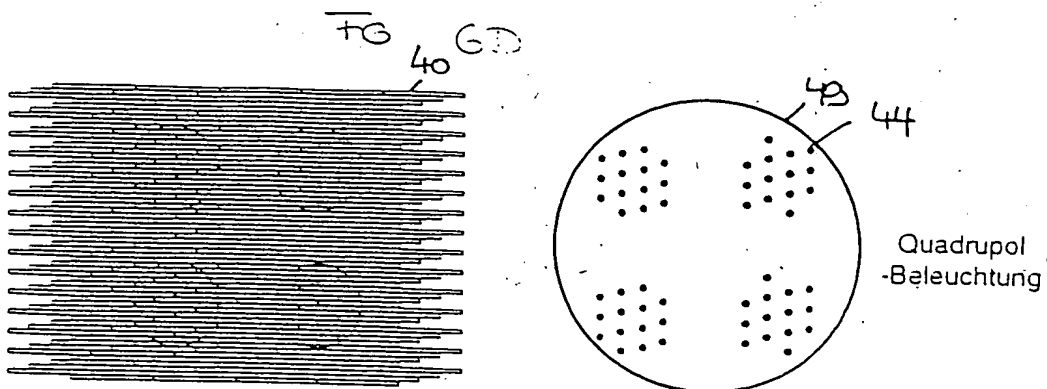
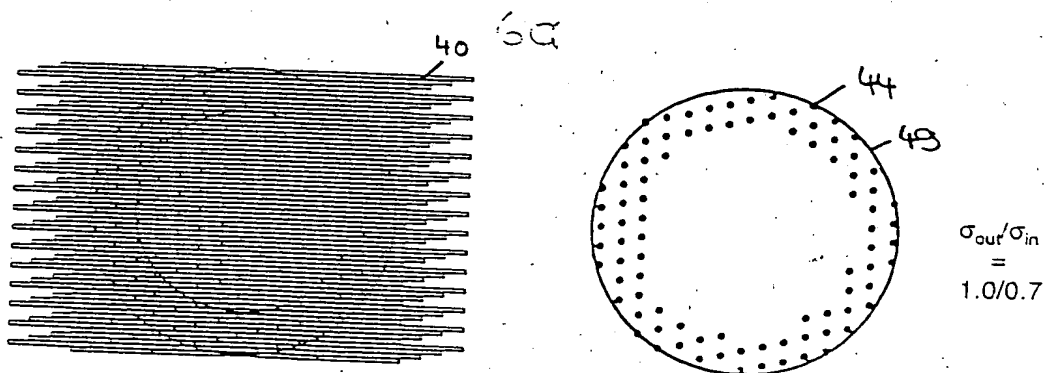
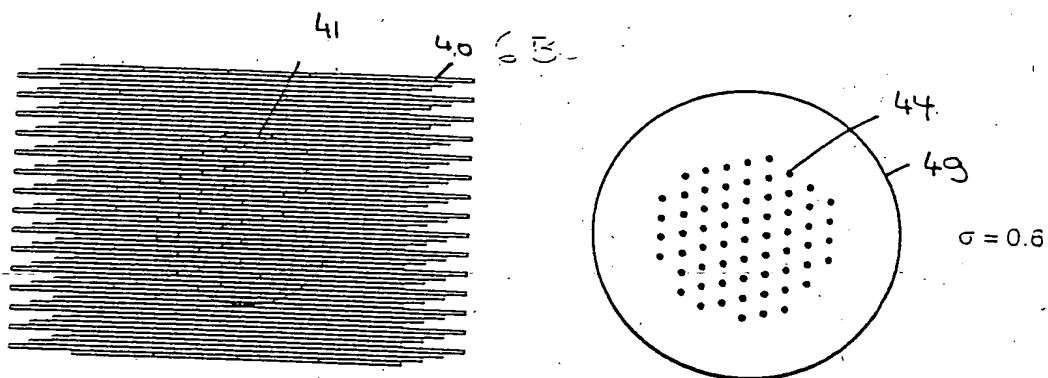
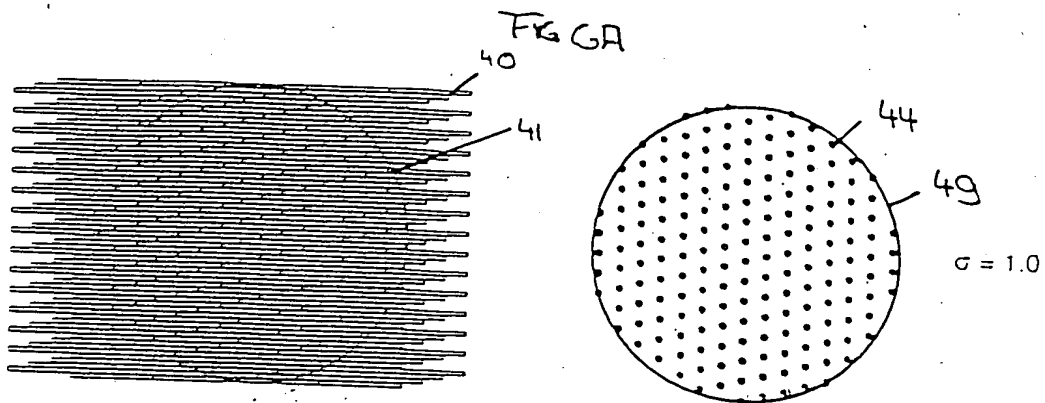


FIG. 4M

Integrale Scanenergie In der Retikelebene
Doppelfacetten-WaKo für Wiggler-Quelle





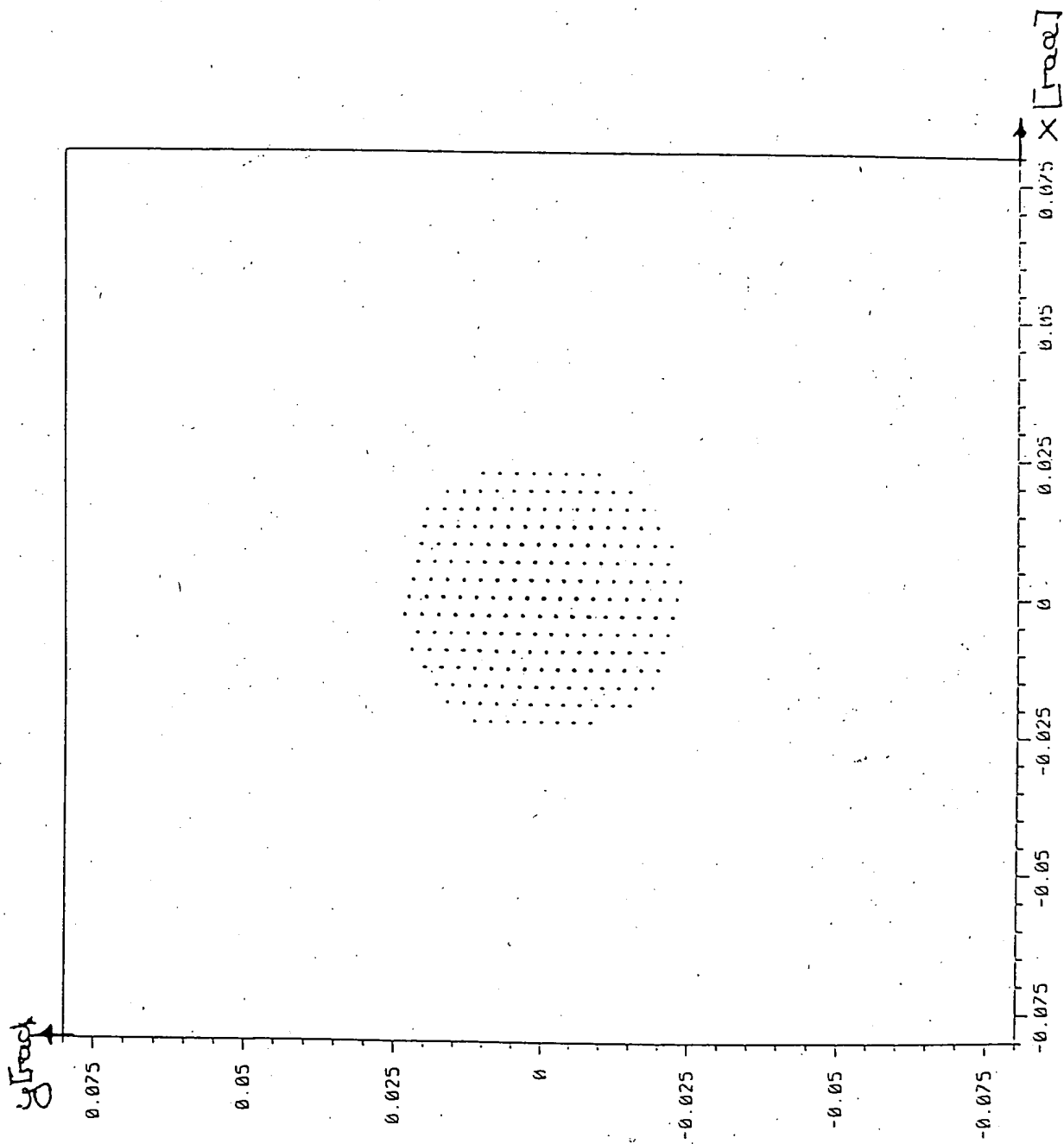
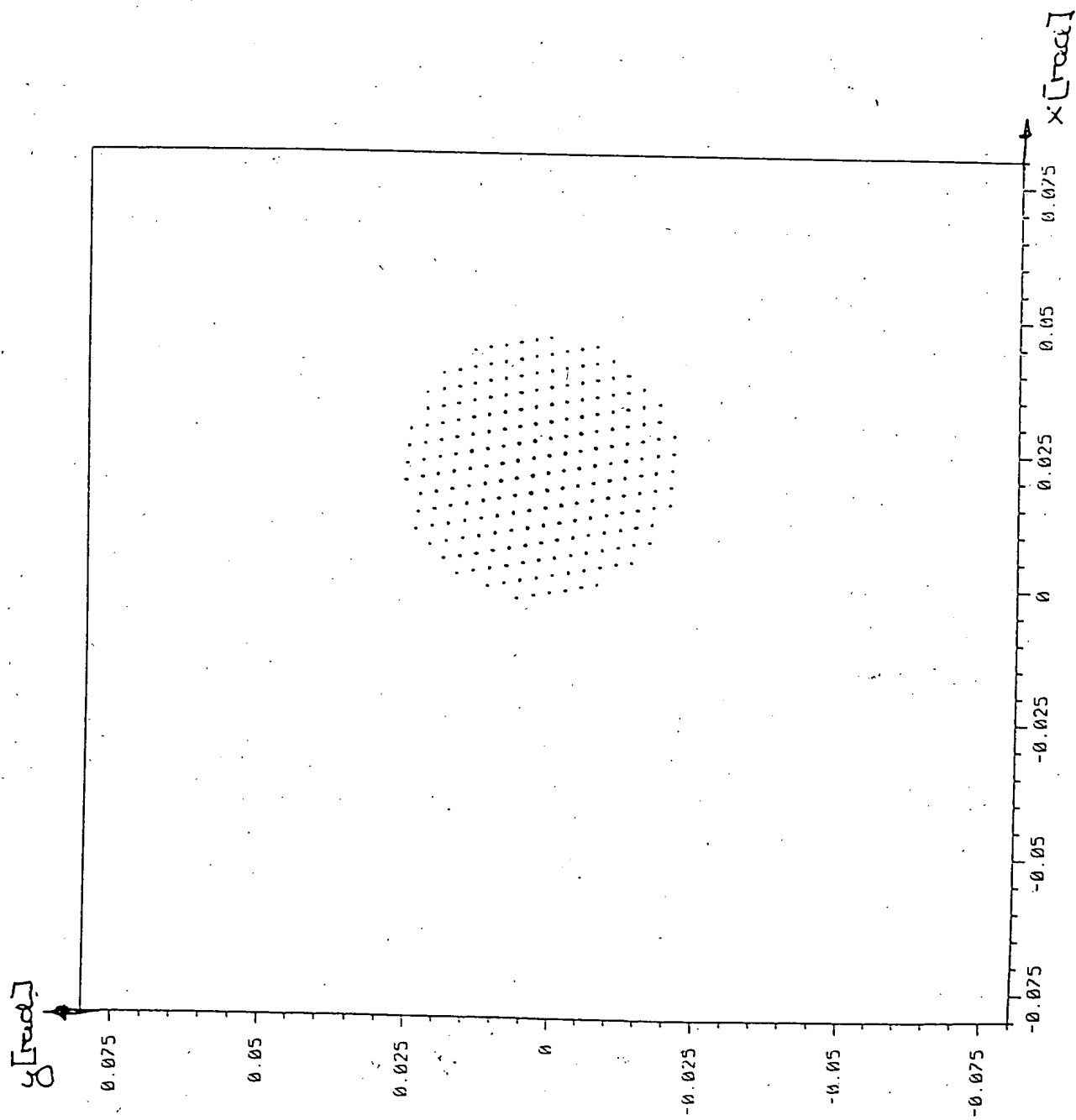


Fig. 7



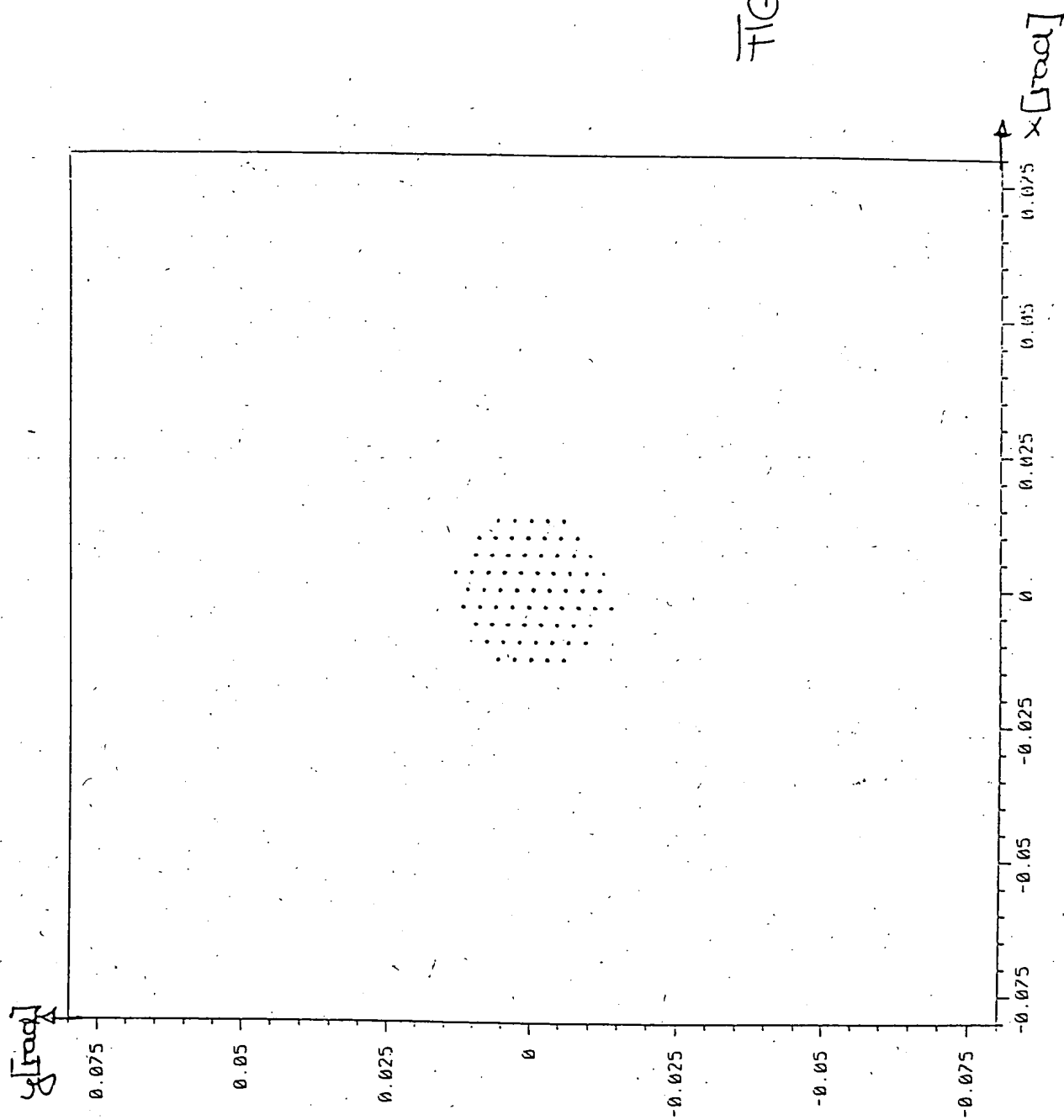


FIG. 9

y_{rad}

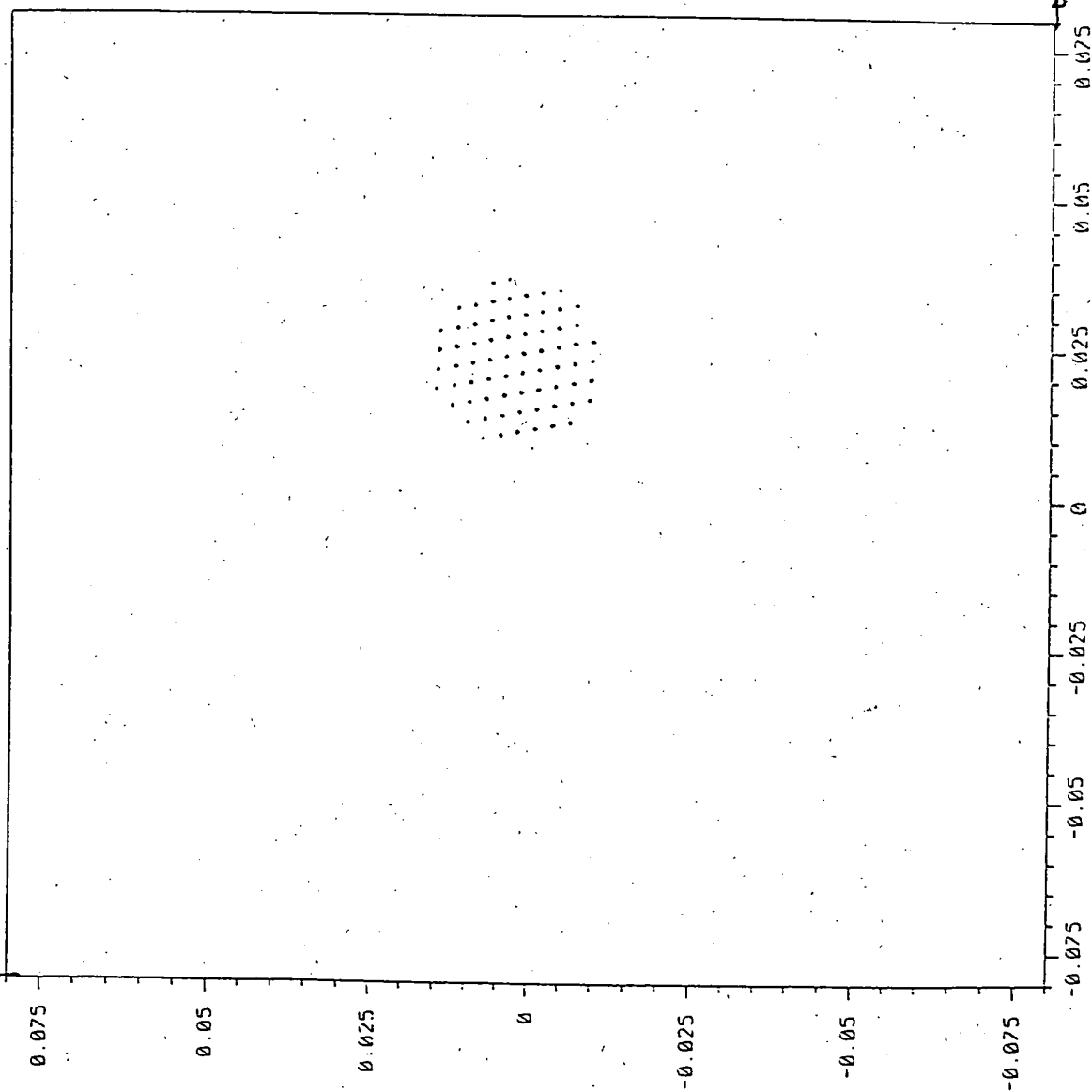
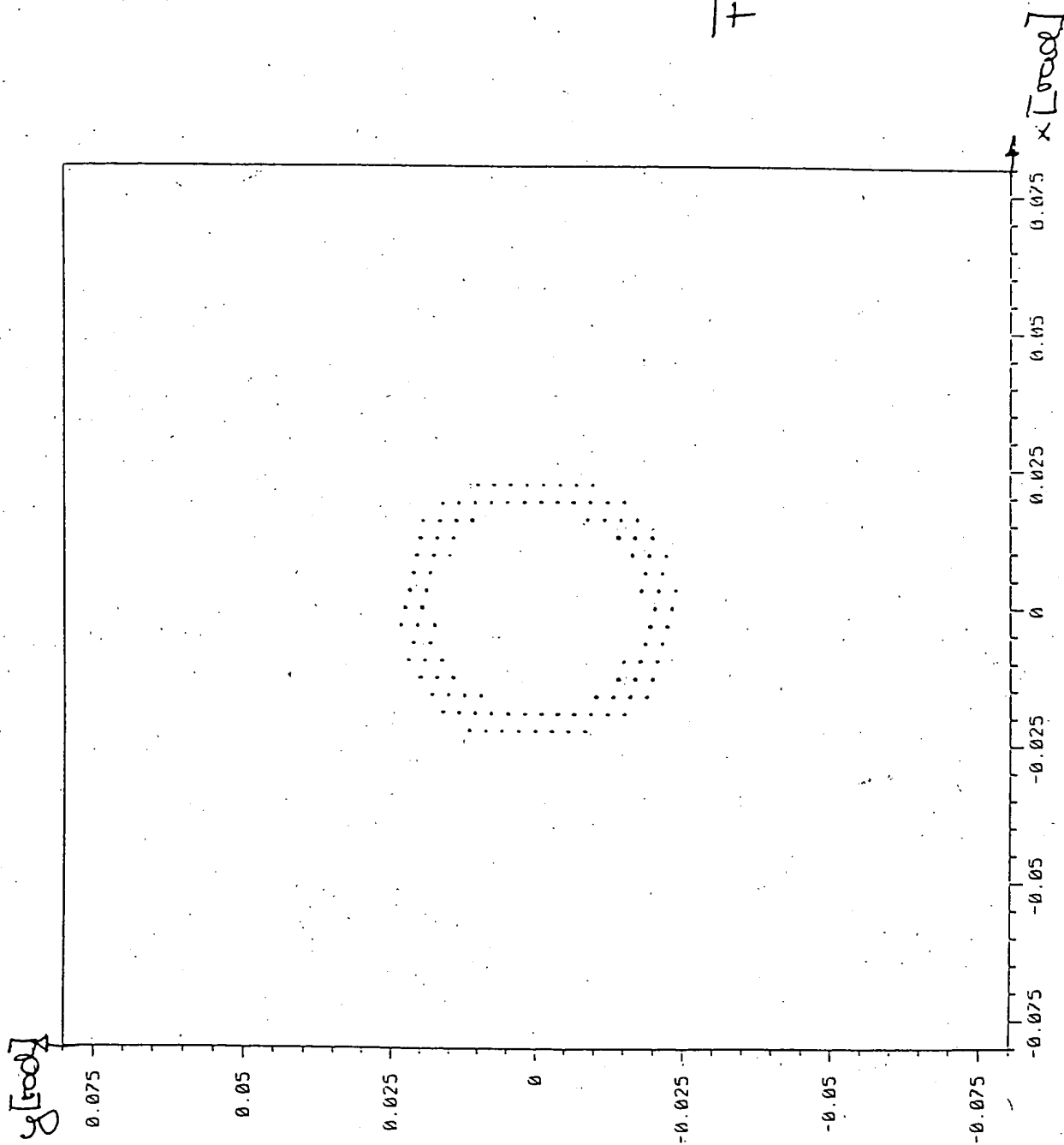


FIG. 10



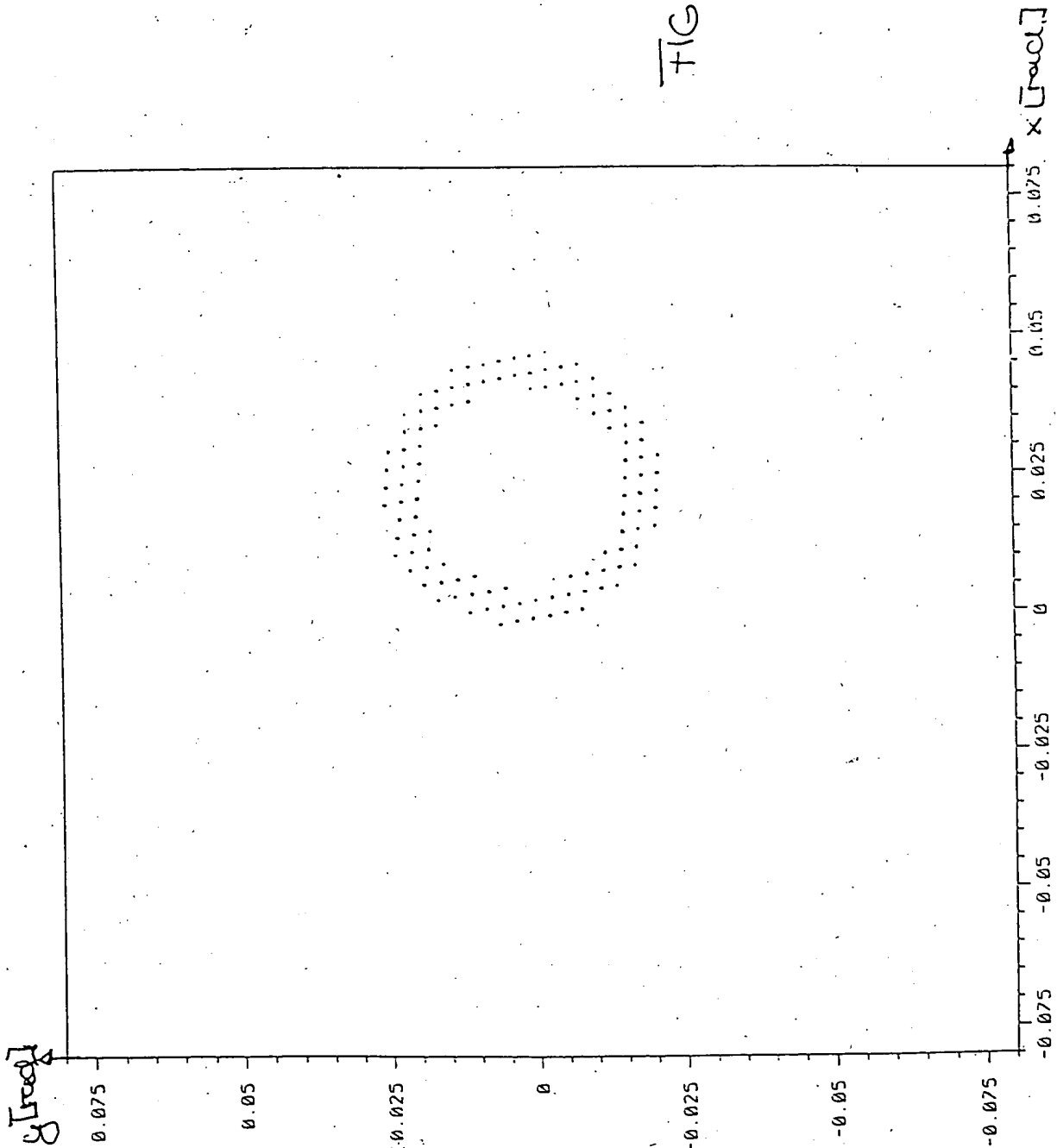
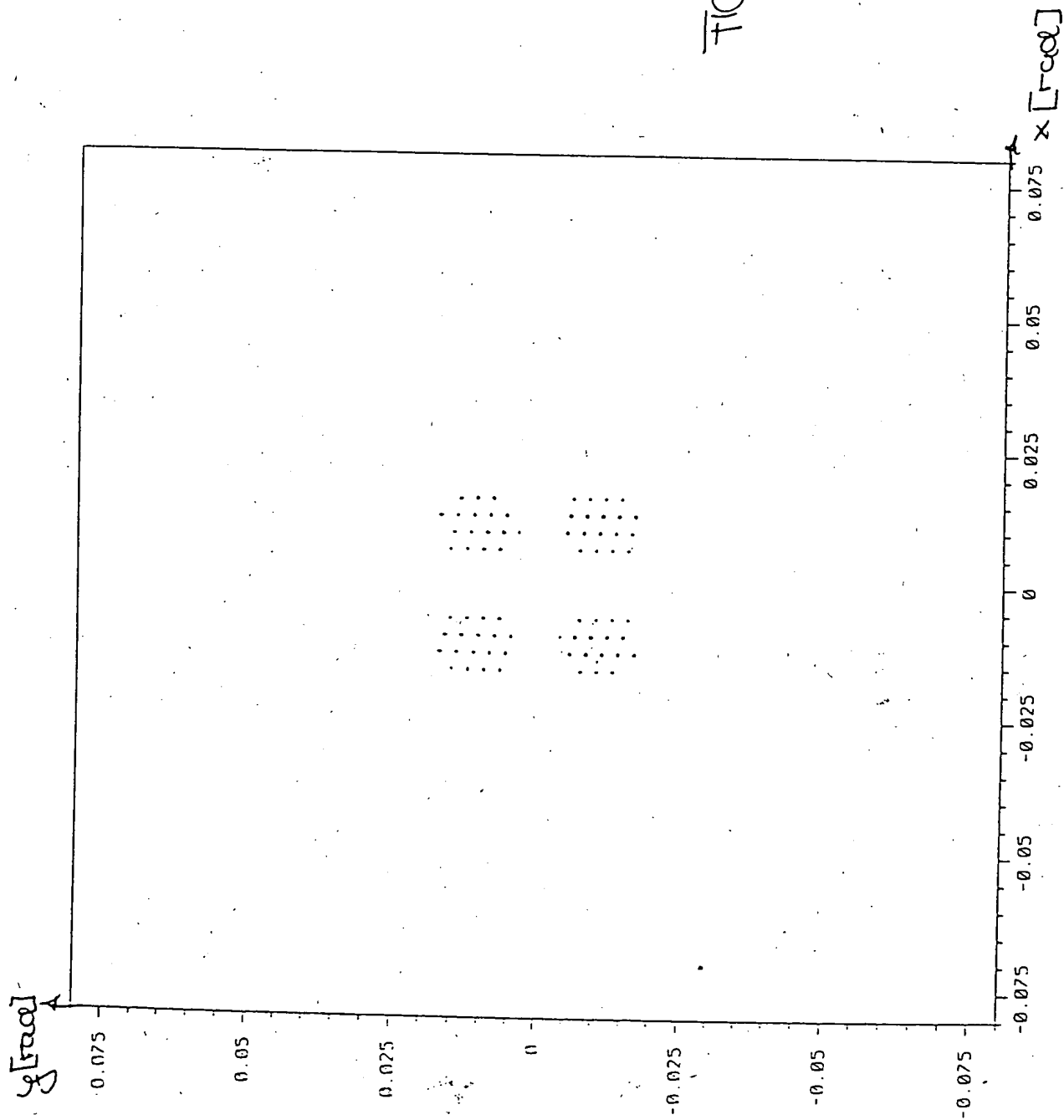
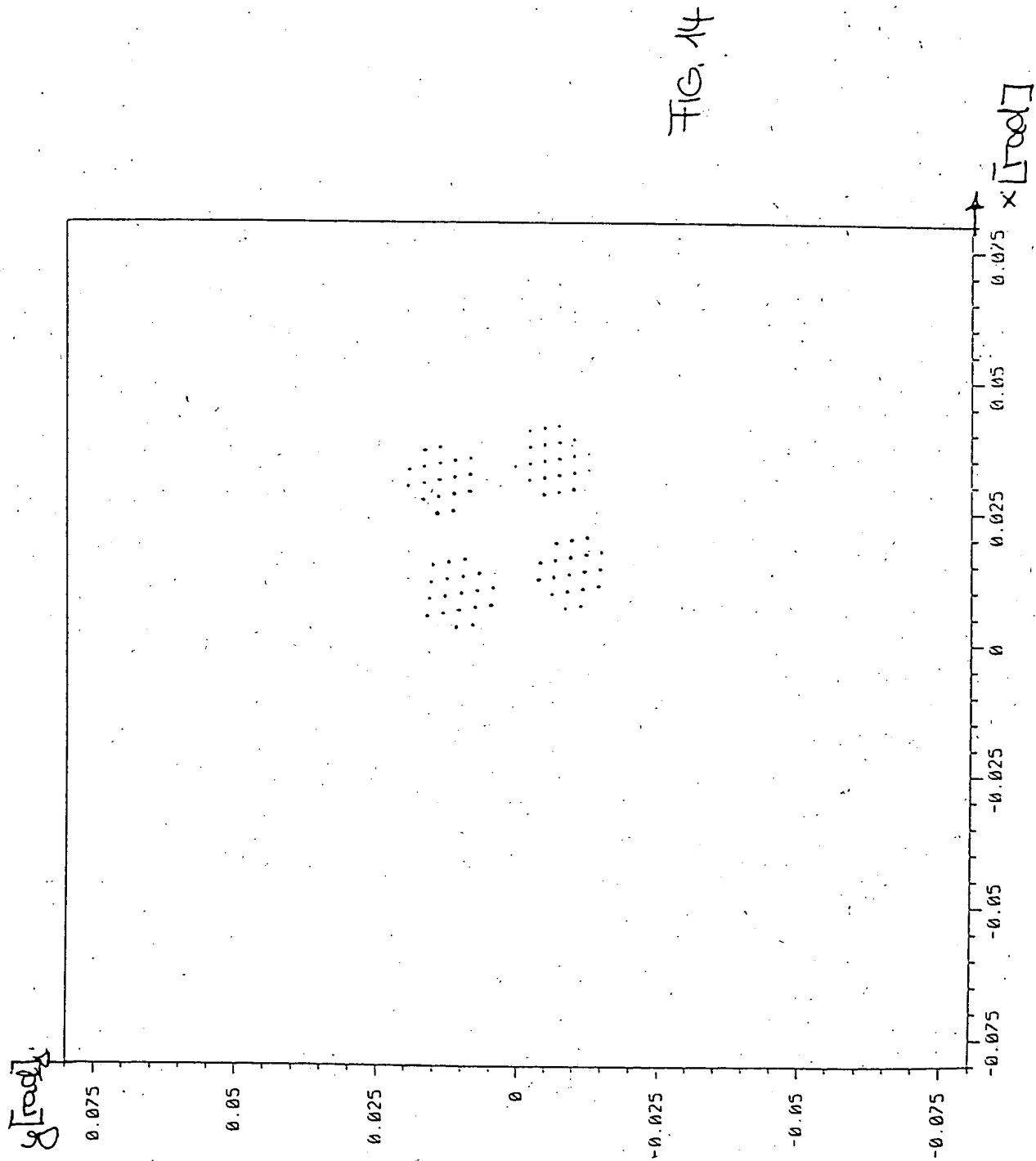


FIG. 12





Integrale Scanenergie in der Retikelebene

$\sigma = 1.0$

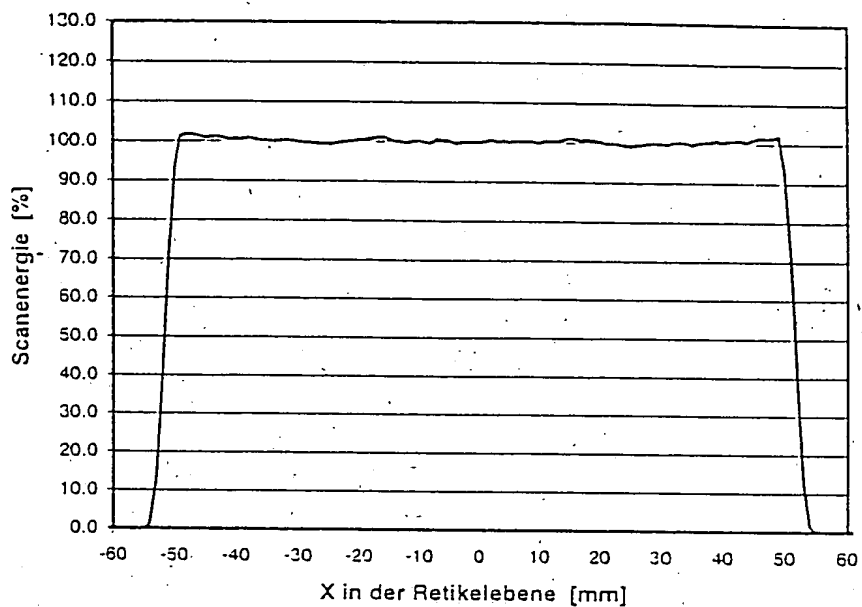


Fig. 15

Integrale Scanenergie in der Retikelebene

$\sigma = 0.6$

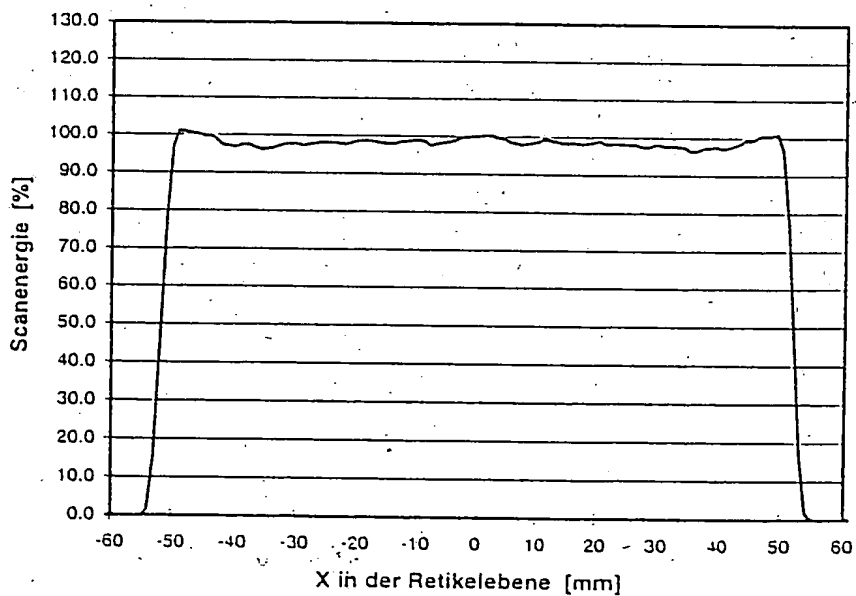


Fig. 16

Integrale Scanenergie in der Retikelebene

$$\sigma_{out}/\sigma_{in} = 1.0/0.7$$

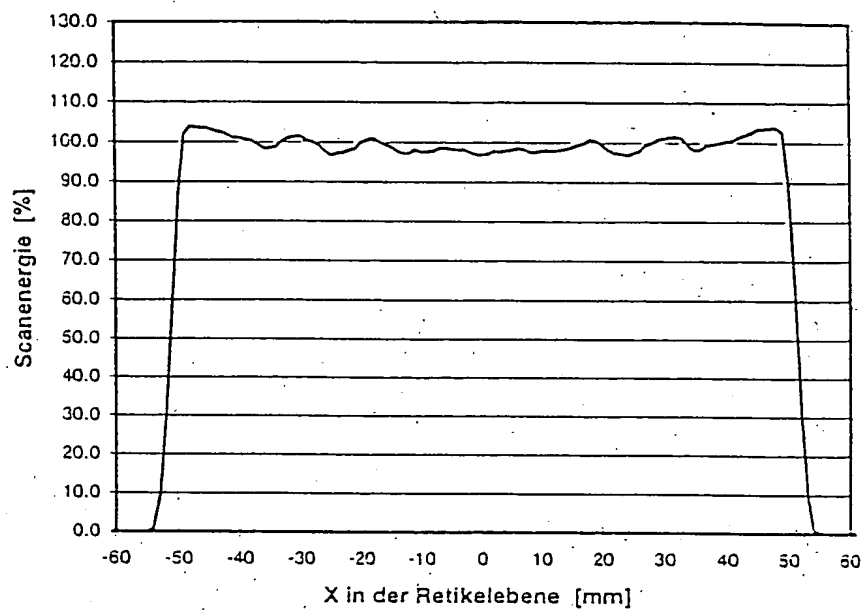


Fig. 17

Integrale Scanenergie in der Retikelebene Quadrupol-Beleuchtung

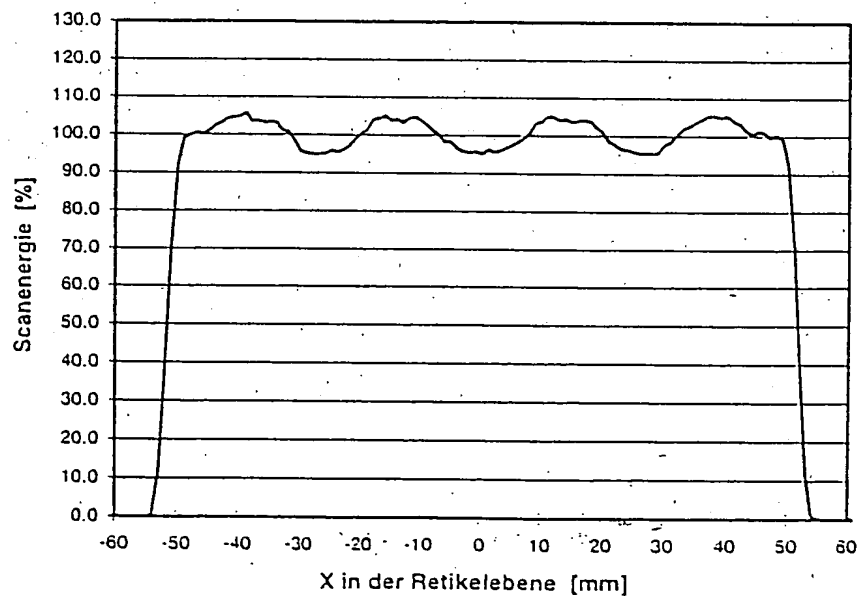


Fig. 18

